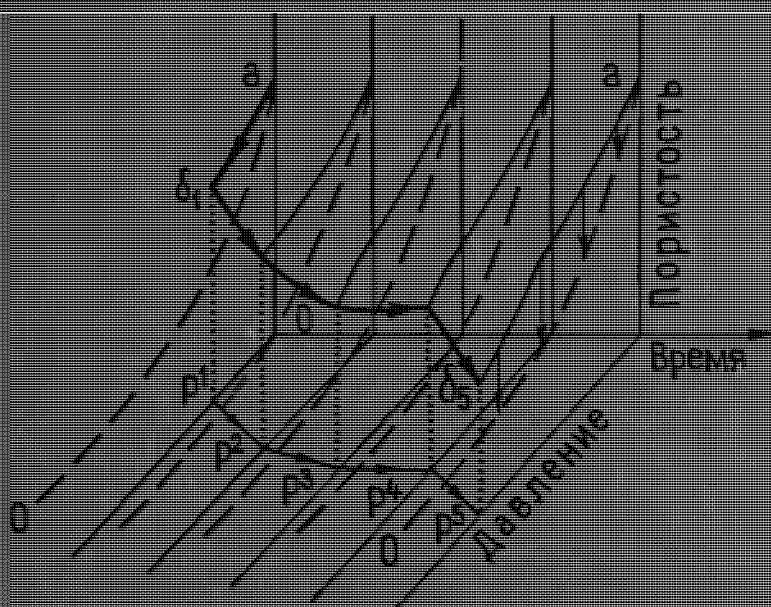


В.Т. Трофимов

# Генезис просадочности лёссовых пород



*В.Т. Трофимов*

---

*ГЕНЕЗИС  
просадочности  
лессовых  
пород*

---

---

*Издательство  
Московского университета  
1999*

УДК 624.131.4; 55  
ББК 26.3  
Т 70

**Трофимов В.Т.**

Генезис просадочности лёссовых пород. — М.: Изд-во МГУ, 1999. — 271 с.: ил.

ISBN 5-211-04069-4

В монографии описаны просадочность как специфическое свойство лёссовых пород, ее генетические типы, гипотезы, выдвинутые в этой области, экспериментальные доказательства части из них, полученные как в ходе лабораторного моделирования, так и при изучении процессов в природных массивах. Рассмотрены логико-графические модели формирования просадочности лёссовых пород разного генезиса и сформулированы основные положения частных и общей теорий формирования просадочности лёссовых пород.

Для геологов, инженеров-геологов, географов, почвоведов, а также студентов и аспирантов вузов, специализирующихся в геологии и инженерной геологии.

*Рецензенты:*

доктор геолого-минералогических наук,  
профессор *В.И. КОРОБКИН*,  
доктор геолого-минералогических наук  
*Б.Ф. ГАЛАЙ*

ISBN 5—211—04069—4

© Трофимов В.Т., 1999

Мир лёссовых пород — мир удивительный. Они всегда привлекали внимание человека и уже многие годы исследуются геологами, почвоведом, географами. Массивы, сложенные лёссовыми породами, мощность которых обычно составляет десятки и даже сотни метров, осваиваются строителями, мелиораторами и под нужды сельского хозяйства. Во всех районах, где встречаются эти породы, их состав специфичен и вместе с тем достаточно близок: это песчано-глинисто-пылеватые системы, основная часть которых представлена тонкопесчаными (0,1—0,05 мм) и особенно крупнопылеватыми (0,05—0,01 мм) частицами. Пылеватость этих пород “усилена” и тем, что в природных условиях более тонкие пылеватые и глинистые частицы агрегированы до размера крупнопылеватых.

Лёссовые породы обладают рядом специфических инженерно-геологических особенностей, которые выделяют их в громадном многообразии грунтов. К категории таких особенностей в первую очередь относятся их чрезвычайно низкая водопрочность и, главное, — просадочность. Последняя выражается в способности лёссовых пород в напряженном состоянии достаточно резко во времени уменьшать свой объем при замачивании.

Просадочные лёссовые породы развиты чрезвычайно широко и установлены, хотя и в разных объемах, на всех континентах кроме Антарктиды. Это свойство стало изучаться инженерами-геологами лишь в XX столетии, хотя уже древним строителям в Средней Азии пришлось с ним столкнуться. К настоящему времени механизм развития просадки — процесса реализации просадочных свойств лёссовых пород при замачивании, сопровождаемом уменьшением их объема, изучен достаточно подробно (Ю.М. Абелев, М.В. Абелев, 1968; Денисов, 1946—1956; Грунтове-



дение, 1971, 1983; Крутов, 1982, 1995; и др.). Основательно изучены и само это свойство лёссовых пород, и факторы, его определяющие, закономерности распространения просадочных разностей в Северной Евразии (Ларионов, Приклонский, Ананьев, 1959; Кригер, 1965; Мавлянов, 1958; Лысенко, 1978; Лёссовые породы СССР, 1966, 1986; и др.), а также методы проектирования и возведения инженерных сооружений на таких грунтах (Крутов, 1982; Пособие по проектированию..., 1986; СНиП 2.02.01—83; Крутов, Богдасаров, 1989; и др.). Было установлено, что просадочными свойствами могут обладать и другие разности горных пород: пылеватые засоленные и незасоленные пески, вулканические пеплы, искусственные грунты.

Генезис просадочных свойств лёссовых пород до сих пор не получил однозначной или хотя бы более или менее определенной трактовки. Исследование этого вопроса — проблемная, сугубо инженерно-геологическая задача, решаемая многие годы хотя и небольшим числом авторов, но исходящих, как показано далее, из принципиально разных постулатов. Специально ориентированные в этом направлении теоретико-методические разработки выполнили В.П. Ананьев, Б.Ф. Галай, Н.Я. Денисов, Н.В. Коломийцев, В.И. Коробкин, Н.И. Кригер, Н.Г. Мавлянов, А.В. Минервин, Е.М. Сергеев, В.Т. Трофимов и их коллеги, результаты экспериментов которых указаны в настоящей работе.

Первые монографические работы, в которых гипотетически (в плане выдвижения гипотезы) действительно рассматривалось происхождение просадочных эоловых, делювиальных, пролювиальных и аллювиальных лёссовых пород, были опубликованы в 1946—1953 гг. Н.Я. Денисовым. Это были, по нашей оценке, выдающиеся по идеям, хотя во многом и повторяющие друг друга, труды, в которых четко сформулировано несколько гипотез формирования рассматриваемого свойства лёссовых пород разного генезиса. Экспериментальные доказательства их действенности были получены много позже и излагаются далее.

В последующие годы целенаправленное изучение генезиса просадочности лёссовых пород проводилось в основном А.В. Минервиным с сотрудниками под руководством Е.М. Сергеева. Они выдвинули новую гипотезу формирования данного свойства, названную мной гипергенно-дегидратационно-разуплотнительной. Позже эта гипотеза в их работах трансформировалась в криоэлювиальную и даже криосин- и криоэпигенетическо-сублимационную (см. гл. 2). Авторами была предпринята попытка, во многом успешная, экспериментально подтвердить некоторые из своих идей. Результаты этих очень интересных работ опубликованы в многочисленных статьях и имеют своеобразный “кусочно-блоч-

ный” итог. В виде монографической сводки они так и не были обобщены.

В 1986 г. вышла в свет интересная монография Н.И. Кригера, авторитетнейшего и старейшего исследователя лёссовых пород, под названием “Лёсс. Формирование просадочных свойств”. Кажалось бы, эта книга, как и работа Н.Я. Денисова (1953), должна была стать этапной в изучении генезиса просадочности лёссовых пород. Однако именно этого, с моей точки зрения, и не произошло, поскольку в книге в основном рассмотрены факторы, определяющие величину просадочности, энергетика и геохимия лёссов, связь ее (просадочности) с условиями географической среды. Рассмотрение генезиса просадочности, т.е. геологического процесса ее формирования, по существу, далее популяризации “принципа Денисова” (Кригер, 1969) не продвинулось.

Мы занимались проблемами генезиса просадочности лёссовых пород не один год — и в теоретическом, и в экспериментальном, и в региональном плане. Нам представляются главными следующие три позиции: 1) систематика и характеристика содержания выдвинутых разными авторами гипотез о формировании просадочности лёссовых пород; 2) обобщение экспериментальных данных, полученных в процессе лабораторного и полевого (в массиве пород) моделирования просадочности лёссов различного генезиса (эоловых, делювиальных, пролювиальных, аллювиальных и др.) разными авторами; 3) обобщение предложенных ранее и создание новых логико-графических моделей формирования сингенетической и эпигенетической просадочности лёссовых пород разного генезиса применительно к объему элементарного слоя и различно построенных толщ таких пород. Уже в ходе написания монографии была в определенной степени реализована четвертая позиция — формулировка основных положений частных и общей теорий формирования просадочности лёссовых пород. Первые, частные теории характеризуют закономерности формирования просадочности лёссовых пород различного генезиса (эолового, пролювиального и др.) по отдельности, аналитически, как принято говорить в инженерной геологии. Общая же теория рассматривает общие, синтетические закономерности описываемого процесса. Как все это получилось — судить читателю.

Первая работа, освещающая вопросы инженерной геологии лёссовых пород была опубликована автором в 1963 г. Позже (1966, 1968 гг.) совместно с А.В. Минервиным и Я.Е. Шаевичем (1986) были опубликованы обзоры о лёссовых породах Западной Сибири в отдельных ее районах. В них затрагивались и вопросы генезиса просадочности. В частности, было показано,

что просадочные разности во многих районах, а в центральной части этого региона повсеместно, развиты только в узких, приречных, прогрессивно дренируемых в настоящее время массивах и это свойство формируется под воздействием гипергенно-дегидратационно-разуплотнительного механизма. На остальной прилегающей территории пылеватые породы под влиянием гипергенно-разуплотнительного механизма приобретают в верхней части разреза высокую пористость (до 45—50%), но сохраняют повышенную естественную влажность и являются непросадочными.

В последующие годы мы занимались проблемами региональной инженерной геологии, в том числе инженерной геологии лёссовых пород. При этом, можно сказать, в центре внимания оставались публикации, касающиеся проблемы генезиса просадочности. В те годы (конец шестидесятых — семидесятые) на кафедре грунтоведения и инженерной геологии геологического факультета Московского университета им. М.В. Ломоносова под влиянием идей А.В. Минервина и благодаря настойчивости ее заведующего Е.М. Сергеева была осуществлена, как уже отмечалось, трансформация взглядов на генезис просадочности лёссовых пород: от признания в качестве основного гипергенно-дегидратационно-разуплотнительного механизма формирования этого свойства к криоэлювиальному, а затем и криоэпи- и криосингенетическо-сублимационному механизму (Минервин, 1982; Минервин, Комиссарова, 1983). Работая в те годы в области распространения многолетнемерзлых пород, изучив состав и строение их толщ, в том числе и пылеватых по составу, наблюдая особенности их поведения при переходе температур в область положительных значений, мы неоднократно (Трофимов, 1980, 1986, 1986а) публично высказывали критику в адрес авторов таких концепций. Более того, подобная критика “подвигала” А.В. Минервина и его коллег, многие из которых никогда не работали в условиях криолитозоны, все более и более в сторону “криогенезных” позиций. В этой ситуации стала необходима постановка серии специальных экспериментальных работ, направленных на исследование всех постулированных в литературе механизмов формирования просадочности, реальное воплощение которых необходимо было провести “разными руками” и на разных объектах-образцах.

Первые эксперименты в этом направлении были выполнены под нашим руководством А.М. Ворониным еще в 1968 г. при подготовке его дипломной работы и были посвящены изучению роли сезонного промерзания-протаивания пылеватых пород в условиях открытой системы как составляющей части гиперген-

но-дегидратационно-разуплотнительного механизма формирования просадочности лёссовых пород. Позже этот вопрос стал объектом интересной экспериментальной диссертационной работы А.М. Воронина, который ее выполнял под руководством Е.М. Сергеева и успешно защитил в 1973 г. К сожалению, эти экспериментальные материалы получили, с нашей точки зрения, узкую интерпретацию в работах ряда других авторов и во многом послужили переходу на криоэлювиальную позицию в вопросах генезиса просадочности лёссовых пород.

В связи с этим в 1976—1977 гг. нами была разработана программа экспериментальных лабораторных и полевых работ, ориентированная на исследование различных высказанных в литературе механизмов формирования просадочности, прежде всего дегидратационно-недоуплотнительного (Н.Я. Денисов), дегидратационно-доуплотнительного (Н.Я. Денисов) и гипергенно-дегидратационно-разуплотнительного. Реализация этой программы, основные результаты которой изложены в книге, стала возможной только благодаря совместной многолетней работе с сотрудниками названной кафедры и Тюменской инженерно-геологической экспедиции геологического факультета МГУ (Н.Г. Фирсов, В.Г. Кудряшов, В.С. Бондаренко, А.Б. Гусев, М.Р. Горский, М.И. Яковлев, В.Г. Волнухин), аспирантами (А.В. Ершова, Е.Ю. Куликова, Т.В. Андреева) и студентами кафедры (Т.Г. Алексеев, В.С. Бондаренко, Л.О. Васильева, А.С. Ветров, М.Р. Горский, А.В. Ершова, Т.Д. Колотова, К.Я. Назмиева, М.И. Яковлев). Практически все они участвовали в публикациях (Трофимов и др., 1980—1995), совместную работу с ними автор вспоминает с благодарностью. Особо автор считает необходимым выделить В.С. Бондаренко, внесшего значительный вклад в проведение как лабораторных, так и чрезвычайно трудоемких натурных экспериментов с целью исследования гипергенно-дегидратационно-недоуплотнительного механизма формирования просадочности лёссовых пород разного возраста и генезиса, и А.В. Ершову, успешно защитившую в 1997 г. кандидатскую диссертацию на тему “Экспериментальное доказательство и логико-графическая модель формирования просадочности аллювиальных пылеватых пород при дегидратации”.

В процессе проведения намеченной программы наряду с сугубо экспериментальными исследованиями был выполнен целый ряд теоретических разработок. Среди них в первую очередь следует назвать представления о просадочности как сингенетическом и как эпигенетическом свойстве лёссовых пород (1980), предложения по классификации гипотез о генезисе просадочности лёссовых пород (1980—1989), выделению типов и видов

изменения величины просадочности по разрезу толщи лёссовых пород (1985), номенклатуре этих пород с инженерно-геологических позиций (1992), классификации толщ лёссовых пород по их вертикальному строению и особенностям изменения просадочности (Шаевич, Трофимов, 1987). К этой же категории следует отнести и обобщение о максимальных мощностях просадочных толщ лёссовых пород. Все эти проблемы в разном объеме рассмотрены в предлагаемой работе.

Некоторые из этих теоретических разработок были выполнены в ходе исследований по изучению опорных инженерно-геологических разрезов СССР, в рамках которых одним из соруководителей по инженерно-геологическому направлению был автор. Эти работы были завершены в 1990 г. и дали уникальный, к сожалению, в основном до сих пор не опубликованный материал. Автор излагал свои представления по указанным вопросам на совещаниях по цикличности строения толщ и изменения свойств лёссовых пород и его использованию при инженерно-геологических изысканиях (1983, 1985, 1987 гг.), будучи одним из их организаторов, под редакцией автора вышли в свет труды совещаний, прошедших в 1985 г. в Ровно и в 1987 г. в Пятигорске. В обобщенном виде многие из этих позиций рассматривались на Всесоюзном совещании по инженерной геологии лёссовых пород в 1989 г. в Ростове-на-Дону. Сборник пленарных докладов "Современные проблемы инженерной геологии лёссовых пород" опубликован также под редакцией автора в 1989 году.

Содержание предлагаемой монографии во многом необычно для инженерно-геологической литературы, имеет не морфологическую, а генетическую направленность. Некоторые вопросы, как номенклатурные, так и интерпретации ряда данных в генетическом аспекте, носят дискуссионный характер. Ряд критических замечаний и даже возражений уже высказывались. Это говорит о том, что вопросы, затронутые в данной работе, необходимо обсуждать, предлагать новые взгляды на старые, казалось бы, устоявшиеся позиции и что назрело время создания нового обобщения по проблеме генезиса просадочности лёссовых пород. Надеемся, что оно заинтересует не только инженеров-геологов, но и более широкий круг читателей, связанных с изучением лёссовых пород, — геологов, палеогеографов, почвоведов.

---

# ПРОСАДОЧНОСТЬ — СПЕЦИФИЧЕСКОЕ СВОЙСТВО ЛЁССОВЫХ ПОРОД

---

## 1.1.

### Просадочность лёссовых пород и просадка их толщ

Просадочность — важнейшее инженерно-геологическое свойство ряда горных пород. Оно выражается в их способности под действующей нагрузкой (от собственного веса толщи или дополнительной нагрузки от сооружения) при увлажнении (замачивании) уменьшать свой объем, т.е. проявлять дополнительное уплотнение. Процесс реализации последнего, развивающегося во времени, как правило с большой скоростью, и получил название “просадка”, а горные породы, ее проявляющие, называются просадочными.

Ряд исследователей (Ю.М. Абелев, Н.И. Кригер и др.) предлагали различать собственно просадки лёссовых толщ и дополнительную осадку<sup>1</sup> сооружений, возводимых на них, возникающие при замачивании пород. Первая — собственно просадка — представляет деформации толщ лёссовых пород при увлажнении, порождаемую только действием собственного веса пород этой толщи. Дополнительная осадка при замачивании возникает не только в результате действия собственного веса толщи, но и под дополнительной нагрузкой от инженерного сооружения.

К просадочным грунтам относятся лёссовые породы, некоторые разности мелких и пылеватых песков (в частности, засоленных, с повышенной прочностью межчастичных структурных связей), вулканических пеплов и искусственных водоне-

---

<sup>1</sup> Логичнее было бы ее назвать “дополнительная просадка”.

насыщенных грунтов. В.И. Крутов (1982) среди последних называет глинистые насыпные грунты, такие отходы промышленных производств, как золы, колосниковую пыль. Однако среди этого многообразия просадочных природных и искусственных грунтов лёссовые породы являются наиболее распространенными. Понятия “лёссовые породы” и “просадочность” тесно связаны друг с другом.

Просадочность лёссовых пород обусловлена особенностями их состава, состояния и строения. Здесь в первую очередь наиболее важными являются следующие пять позиций: 1) лёссовые породы представляют собой структурированные песчано-глинисто-пылеватые дисперсные системы с резким преобладанием пылеватых частиц и обладают малой гидрофильностью, что обуславливает отсутствие или очень малую величину потенциального их набухания при увлажнении; 2) лёссовые породы характеризуются низкими значениями плотности скелета и высокой пористостью (42—55% и даже несколько выше), причем среди пор преобладают поры открытые; 3) эти породы до момента замачивания обладают низкой природной (естественной) влажностью и соответственно твердой или полутвердой консистенцией; 4) в лёссовых породах в различных, нередко больших количествах (до 10% и более) присутствуют карбонаты и водно-растворимые соли, которые в условиях невысокой природной влажности обуславливают структуру переходного (коагуляционно-цементационного) типа с высокой прочностью структурных связей и всего грунта в целом; 5) прочность такой структуры в лёссовых породах резко по величине и быстро во времени падает при водонасыщении (вплоть до практически моментального размокания небольших образцов, помещенных в спокойную воду).

“Просадка грунта — это сложный физико-химический процесс. Основным его проявлением является уплотнение грунта за счет перемещения и более компактной укладки отдельных частиц и их агрегатов, благодаря чему понижается общая пористость грунта до состояния, соответствующего действующему давлению. В связи с повышением степени плотности грунта после просадки прочностные характеристики его несколько возрастают. При дальнейшем увеличении давления процесс уплотнения лёссового грунта в водонасыщенном состоянии продолжается, вместе с этим увеличивается и его прочность.

Изложенное выше показывает, что необходимыми условиями для проявления просадки грунта являются: а) наличие нагрузки от собственного веса грунта или фундамента, способной при увлажнении преодолевать силы связности грунта; б) достаточное

увлажнение, при котором в значительной степени снижается прочность грунта. Под совместным влиянием этих двух факторов и происходит просадка грунта" (Крутов, 1982, с. 6).

Наличие и величина просадочности лёссовых пород четко отображаются на компрессионной кривой, которая обычно строится в координатах "коэффициент пористости ( $e$ ) — давление ( $P$ )". Эта кривая для просадочных разностей грунтов имеет очень характерную форму, обусловленную резким, скачкообразным уменьшением коэффициента просадочности под действующим давлением при замачивании (рис. 1). На этом графике отрезок *аб* отображает характер уплотнения природного грунта с низкой величиной естественной влажности под нагрузкой; участок *бв* соответствует реализации просадочных свойств — про-

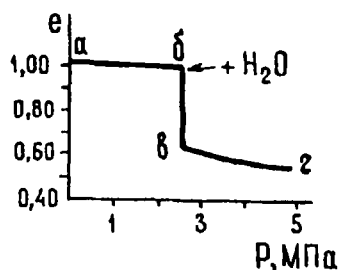


Рис. 1. Кривая компрессионного испытания просадочной лёссовой породы, замоченной при нагрузке 0,3 МПа

садке грунта при замачивании при данном давлении, а отрезок *вз* — уплотнению просевшего увлажненного или водонасыщенного грунта при возрастании действующего давления.

Величина отрезка *бв*, характеризующая изменение коэффициента пористости при данном давлении при замачивании, первоначально получила название "коэффициент макропористости". Этот термин неоднократно подвергался критике, прежде всего из-за того, что просадочность обусловлена не только (а часто даже не столько) наличием и уменьшением макропор — пор размером более одного миллиметра. Кроме того, надо иметь в виду, что, поскольку величина просадки зависит от давления, действующего на грунт при замачивании, значения коэффициента макропористости оказываются разными при неодинаковых нагрузках.

Характер развития просадки во времени определяется как особенностями лёссовых пород, так и особенностями повышения их влажности (до значений, превышающих начальную просадочную влажность, — см. далее), видом источника замачивания и динамикой изменения действующей нагрузки. В.И. Крутов (1982, с. 41) в развитие этого тезиса писал: "При местном аварийном замачивании просадка грунтов в пределах деформируемой зоны от нагрузки фундаментов обычно протекает быстро во времени с интенсивностью 1—5 см в сутки и после прекращения замачивания через несколько суток наступает ее стабилизация. В этом



случае если первичное замачивание грунтов происходило в пределах лишь части деформируемой зоны или просадочной толщи, то каждое последующее замачивание будет приводить к просадкам грунтов до тех пор, пока не будет увлажнена вся деформируемая зона или просадочная толща. По мере возрастания нагрузки на грунт просадка увеличивается и полная ее стабилизация наступает при достижении максимальной или проектной нагрузки и промачивания всей толщи просадочных грунтов.

При непрерывном интенсивном замачивании сверху развитие просадки грунтов от их собственного веса во времени определяется в основном продвижением вниз фронта увлажнения и формирования увлажненной зоны. В этом случае просадка начинается после того, как фронт увлажнения достигает глубины  $h_{с.в.}$ , с которой начинается просадка грунта от собственного веса и заканчивается после промачивания всей толщи просадочных грунтов и завершения формирования увлажненной зоны. Исследования показывают, что при непрерывном замачивании скорости просадок во времени сначала возрастают до максимальной величины, а затем снижаются. После прекращения замачивания скорости просадок грунтов, как правило, вначале возрастают, что вызывается снижением их влажности и созданием более благоприятных условий для самоуплотнения грунта, а затем стабилизируются.

Развитие просадок грунтов во времени при подъеме уровня грунтовых вод связано с интенсивностью повышения уровня грунтовых вод, относительной просадочностью нижних слоев грунтов. Стабилизация уплотнения грунта в этом случае проходит в течение длительного времени и связана с оттоком свободной воды из пор грунта, скелет которого находится во взвешенном состоянии. При возможном последующем снижении уровня грунтовых вод снимается взвешивающее действие воды, увеличивается нагрузка на грунт до бытовой и начинается повторная просадка грунта”.

Ряд специалистов, связанных прежде всего с ирригационным и гидротехническим строительством (А.А. Кириллов, А.Л. Рубинштейн, Н.Н. Фролов и др.), подразделяют общую деформацию просадки на две составляющие: 1) просадку и 2) послепросадочное уплотнение<sup>1</sup>. Первая из них включает первую стадию просадочного процесса и протекает сравнительно быстро во времени (1—3 месяца); ее связывают с уплотнением, обусловленным

---

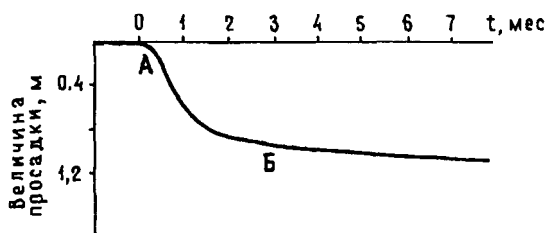
<sup>1</sup> Логичнее было бы использовать термины “просадочное” и “послепросадочное” уплотнение.

снижением структурной прочности лёссового грунта при увлажнении. Вторая составляющая — послепросадочное уплотнение — включает дальнейшее уплотнение грунта, связанное прежде всего с суффозионными процессами и растворением солей, а также консолидационным процессом.

В.И. Крутов (1982) справедливо подчеркнул, “что такое представление развития просадки грунта от собственного веса во времени достаточно условное, как и существующие предложения по установлению границы между просадкой и послепросадочным уплотнением. С учетом происходящих при замачивании грунтов физико-химических процессов более правильно просадку грунтов во времени рассматривать как реологический процесс их уплотнения, связанный с нарастанием пластических деформаций во времени при постоянной нагрузке и влажности”.

Рис. 2. Развитие просадки лёссовой породы во времени (по В.И. Крутову, 1982; с изменениями):

0 — время начала замачивания породы; А — начало просадки; Б — величина просадки к моменту прекращения замачивания



Общий характер просадочного уплотнения лёссового грунта от собственного веса во времени при длительном его замачивании показан на рис. 2. Хорошо видно, что в первый период просадки развитие уплотнения идет интенсивно, а затем существенно замедляется. Полное же затухание просадки толщи лёссовых пород даже при интенсивном непрерывном замачивании сверху наступает, по данным В.И. Крутова (1982), лишь через 1—3 года.

## 1.2.

### Показатели просадочности лёссовых пород

Для оценки просадочных свойств в инженерной геологии предложена система характеристик, включающая косвенные и прямые показатели. Часть первой их группы в литературе также называется, по предложению В.И. Крутова (1982), показателями просадочности, а второй — критериями просадочности.

**Косвенные показатели просадочности** характеризуют потенциальную склонность лёссовых пород к проявлению просадки при

замачивании. Они, по существу, представляют собой совокупность частных показателей и их производных, определяющих просадочность рассматриваемых пород. Эти показатели дают возможность определить, точнее, оценить склонность тех или иных лёссовых пород к просадочности, но не позволяют однозначно (достоверно) и, главное, количественно охарактеризовать величину реальной просадочности грунта.

Таких показателей в истории инженерно-геологического изучения лёссовых пород было предложено немало. Рассмотрим некоторые из них.

Одним из косвенных показателей служит *плотность скелета лёссового грунта* ( $\rho_d$ ) и его производное — *коэффициент пористости* ( $e$ ). В.И. Крутов (1998) предложил лёссовые породы в зависимости от степени плотности с учетом возможной их степени просадочности подразделять на три вида:

средней плотности  $e < 0,7$  ( $\rho_d > 1,60 \text{ т/м}^3$ );  
рыхлые при  $0,7 < e < 1,0$  ( $1,60 \text{ т/м}^3 > \rho_d > 1,35 \text{ т/м}^3$ );  
очень рыхлые,  $e > 1,0$  ( $\rho_d < 1,35 \text{ т/м}^3$ ).

При таком подразделении лёссовые грунты средней плотности, как правило, всегда будут относиться к практически непросадочным “вне зависимости от значений физических характеристик грунтов и при любых давлениях на них. В то же время очень рыхлые лёссовые грунты, наоборот, в большинстве случаев (за исключением полного водонасыщения) будут относиться к просадочным с наиболее высокими значениями относительной просадочности. Рыхлые лёссовые грунты занимают промежуточное положение между этими двумя видами, и степень их просадочности в основном будет определяться влажностью грунта.

Предлагаемое подразделение лёссовых грунтов по степени плотности на три вида должно использоваться при общей оценке грунтов, для более обоснованного назначения комплекса лабораторных и полевых испытаний грунтов, при выборе вида основания, конструкции фундаментов, назначении комплекса противопросадочных мероприятий и решении многих других вопросов. Например, при залегании в основании фундаментов лёссовых грунтов средней плотности не требуется применять какие-либо противопросадочные мероприятия. При очень рыхлых лёссовых грунтах, наоборот, обычно необходимо полное устранение их просадочных свойств или прорезка свайными фундаментами с дополнением во многих случаях водозащитными и конструктивными мероприятиями. Обеспечение прочности и нормальной эксплуатации зданий и сооружений на рых-

лых лёссовых грунтах может быть достигнуто только частичным устранением их просадочных свойств, частичной прорезкой толщии лёссовых грунтов либо применением лишь комплекса водозащитных и конструктивных мероприятий” (Крутов, 1998, с. 56).

Вторым косвенным показателем, используемым для оценки потенциальной просадочности лёссовых пород, является *степень влажности* (водонасыщенности). Известно, что лёссовые, высокопористые грунты со степенью влажности ( $S_r$ ) более 0,8 являются, как правило, непросадочными. В.И. Крутовым (1998) предложена классификация лёссовых пород по этому показателю, которая включает три их вида:

- маловлажные,  $S_r < 0,5$ ;
- влажные,  $0,5 < S_r < 0,7$ ;
- очень влажные,  $S_r > 0,7$ .

“Маловлажные лёссовые грунты характеризуются наибольшей просадочностью. Практически все виды рыхлых и тем более очень рыхлых лёссовых грунтов при степени влажности  $S_r < 0,5$  обладают просадочными свойствами.

Очень влажные лёссовые грунты, наоборот, как правило, практически непросадочные ( $\varepsilon_{sl} < 0,01$ ) и лишь при очень рыхлом сложении и степени влажности в пределах  $S_r = 0,7—0,8$  могут быть слабопросадочными с величиной относительной просадочности до 0,03.

Влажные лёссовые грунты по степени просадочности занимают промежуточное положение между маловлажными и очень влажными. При повышенной плотности и влажности они, как правило, непросадочные, а по мере снижения плотности и влажности просадочность этого вида грунтов возрастает.

Подразделение лёссовых грунтов по степени влажности весьма удобно при общей оценке грунтов, назначении необходимого объема лабораторных и полевых испытаний и особенно при выборе, проектировании и устройстве оснований и фундаментов” (Крутов, 1998, с. 56).

Взаимосвязь просадочности лёссовых пород с их плотностью и степенью влажности охарактеризована в табл. 1. В дополнение подчеркнем две следующие позиции: 1) приведенные в табл. 1 средние значения характеристик для отдельных видов лёссовых пород могут изменяться по коэффициенту пористости и степени влажности на  $\pm 0,05$ , а по плотности скелета грунта — на  $\pm 0,05$  т/м<sup>3</sup>; 2) разновидности грунтов по степени просадочности определены в табл. 2.

Таблица 1

Взаимосвязь просадочности лёссовых пород  
с их плотностью и степенью влажности  
(по В.И. Крутову, 1998)

Разновидности грунтов по степени просадочности	Коэффициент пористости (плотность скелета грунта $\rho_d$ т/м <sup>3</sup> )	Степень влажности $S_r$
Непросадочные	1) $e \leq 0,7$ ( $\rho_d \geq 1,60$ )	1) $S_r > 0,5$
“Условно просадочные”	2) $e > 0,7$ ( $\rho_d < 1,60$ )	2) $S_r \geq 0,8$
	3) $e < 0,7$ ( $\rho_d > 1,60$ )	3) $S_r < 0,5$
	4) $0,7 < e \leq 0,8$ ( $1,60 > \rho_d \geq 1,50$ )	4) $0,5 < S_r \leq 0,7$
Слабопросадочные	1) $0,7 \leq e \leq 0,8$ ( $1,60 > \rho_d \geq 1,50$ )	1) $S_r < 0,7$
	2) $e > 0,8$ ( $\rho_d \leq 1,50$ )	2) $S_r > 0,7$
Среднепросадочные	1) $0,8 < e < 0,9$ ( $1,50 > \rho_d \geq 1,40$ )	1) $S_r < 0,5$
	2) $e > 0,9$ ( $\rho_d < 1,40$ )	2) $S_r > 0,5$
Сильнопросадочные	1) $0,9 < e \leq 1,05$ ( $1,40 > \rho_d \geq 1,30$ )	1) $S_r < 0,3$
	2) $e > 1,05$ ( $\rho_d < 1,30$ )	2) $S_r > 0,3$
Чрезвычайно просадочные	$e > 1,05$ ( $\rho_d < 1,30$ )	$S_r < 0,3$

Еще один косвенный показатель — *показатель просадочности* (П), введенный Строительными нормами и правилами (СНиП П-15-74) в 1974 г.<sup>1</sup>:

$$П = \frac{e_L - e_0}{1 + e_0},$$

где  $e_0$  — коэффициент пористости грунта природного сложения и влажности;  $e_L$  — коэффициент пористости, соответствующий влажности на границе верхнего предела пластичности (границе текучести  $W_L$ ), определяемой по формуле

$$e_L = W_L \frac{\rho_S}{\rho_W},$$

где  $\rho_S$  — плотность твердых частиц грунта,  $\rho_W$  — плотность воды, принимаемая равной 1.

По величине показателя просадочности (который в принципе характеризует естественную недоуплотненность лёссовых пород) при степени влажности менее 0,8 и определенном значе-

<sup>1</sup> Строго говоря, так его назвал В.И. Крутов (1982). В СНиП П-15-74 он назван “показатель П”.

нии числа пластичности можно оценить склонность лёссовых пород к проявлению просадочных свойств. К просадочным относятся грунты с  $\Pi < 0,1$  при числе пластичности (в процентах)  $1 \leq J_p < 10$ , с  $\Pi < 0,17$  при числе пластичности  $10 \leq J_p < 0,17$  и  $\Pi < 0,24$  при  $14 \leq J_p < 0,22$ .

Следует отметить, что в СНИП П-Б.1-62 к просадочным относились лёссовые породы со степенью влажности равной или менее 0,6 и одновременным значением

$$\frac{e_0 - e_L}{1 + e_0} \geq -0,1.$$

Это условие не оказалось универсальным. В частности, в 1967 г. В.П. Ананьев и Я.Д. Гильман показали, что к просадочным лёссовым породам в Ростовской области следовало относить грунты, имеющие степень влажности равную или менее 0,7 и значение расчетного коэффициента равного или большего -0,2.

В качестве косвенного критерия просадочности также используются различно определяемые коэффициенты снижения структурной прочности лёссового грунта при увлажнении. Один из них  $K_c$  рассчитывается по формуле

$$K_c = \frac{C_e}{C_b} \cdot \frac{\varphi_e}{\varphi_b},$$

где  $C_e$  и  $C_b$  — сцепление лёссовой породы при естественной влажности и в водонасыщенном состоянии соответственно;  $\varphi_e$  и  $\varphi_b$  — угол внутреннего трения в тех же состояниях. Связь между величиной просадочности лёссовых пород и коэффициентом  $K_3$  прямо пропорциональная и в целом линейная (Крутов, 1982).

Величина коэффициента снижения структурной прочности лёссового грунта может определяться и по результатам испытаний статическим зондированием:

$$K_3 = \frac{P_e}{P_b},$$

где  $P_e$  и  $P_b$  — сопротивление лёссового грунта конусу зонда при естественной влажности и в водонасыщенном состоянии.

К просадочным относятся лёссовые породы с величиной  $K_3$  больше 2, 1,5 и 1,3 при давлениях на грунт при статических испытаниях при нагрузках 0,1, 0,2 и 0,3 МПа (Крутов, 1982).

**Прямые показатели просадочности лёссовых пород** количественно характеризуют это важнейшее их инженерно-геологичес-

кое свойство. Величина этих показателей непосредственно связана с нагрузкой, величиной и характером увлажнения, при определенных величинах которых возможно развитие просадки. К таким показателям относятся коэффициент относительной просадочности (относительная просадочность), начальное просадочное давление и начальная просадочная влажность. К этой же категории показателей отнесем суммарную просадку толщи лёссовых пород и величину мощности просадочной толщи.

*Коэффициент относительной просадочности*, или относительная просадочность, представляет собой деформацию толщины слоя (образца) испытываемого грунта при его замачивании при данном давлении к его толщине до замачивания. Этот показатель был введен Ю.М. Абелевым еще в тридцатых годах и рассчитывался по формуле

$$\varepsilon_{sl} = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1},$$

где  $e_1$  — коэффициент пористости лёссового грунта естественной влажности, уплотненного без возможности бокового расширения данной нагрузкой;  $e_2$  — коэффициент пористости того же грунта после замачивания при той же действующей нагрузке. Принималось, что если  $\varepsilon_{sl} > 0,02$ , то грунт относился к категории просадочных.

Этот коэффициент, определяемый при компрессионных испытаниях, рассчитывался и через значения высоты образца лёссового грунта:

$$\varepsilon_{sl} = \frac{h_p - h'_p}{h_p},$$

где  $h_p$  — высота образца грунта природного сложения и влажности при давлении  $P$ , равном давлению от собственного веса вышележащих слоев грунта или этого веса и нагрузки от сооружения;  $h'_p$  — высота образца того же грунта при давлении  $P$  после замачивания водой.

Позже СНиП П-15-74, в ряде других работ (Грунтоведение, 1983; Крутов, 1982; и др.) расчет относительной просадочности предписывалось проводить по следующей формуле:

$$\varepsilon_{sl} = \frac{h_p - h'_p}{h_0},$$

где  $h_p$  — высота образца лёссового грунта природного сложения и влажности, обжатого без возможности бокового расширения давлением  $P$ , равным давлению, действующему на рассматри-

ваемой глубине, от собственного веса грунта и нагрузки от фундамента или только от веса грунта до замачивания;  $h_p$  — высота того же образца при давлении  $P$  после замачивания его до полного водонасыщения;  $h_0$  — высота того же образца при давлении, равном давлению от собственного веса грунта.

Величина относительной просадочности, несмотря на то что она зависит от многих факторов (плотности скелета и природной влажности лёссового грунта, величины давления на него, величины повышения влажности и др.), является показателем критериальным (табл. 2).

Таблица 2

Классификация лёссовых грунтов  
по величине относительной просадочности  
(по В.И. Крутову, 1998)

Разновидности грунтов по степени просадочности	Относительная просадочность при давлении на грунт 0,3 МПа	Ориентировочные значения начального просадочного давления $P_{sp}$ МПа
Непросадочные	$< 0,01$	$> 0,3$
“Условно просадочные”	$\sim 0,01$	$> 0,3$
Слабопросадочные	$0,01 \leq \varepsilon_{sl} \leq 0,03$	$0,3 \geq P_{sl} > 0,15$
Среднепросадочные	$0,03 < \varepsilon_{sl} \leq 0,07$	$0,15 \geq P_{sl} > 0,06$
Сильнопросадочные	$0,07 < \varepsilon_{sl} \leq 0,12$	$0,06 \geq P_{sl} > 0,02$
Чрезвычайно просадочные	$> 0,12$	$\leq 0,02$

В.И. Крутов — автор этой классификации — отметил два важных момента: 1) среди непросадочных могут быть выделены “условно просадочные” грунты, относительная просадочность которых при давлениях на грунт более 0,3 МПа или существенном снижении влажности может незначительно превышать 0,01; 2) так как относительная просадочность существенно зависит от плотности и влажности грунтов, определенный интерес представляет приведенная в табл. 1 характеристика разновидностей просадочных грунтов по этим показателям.

Величину относительной просадочности и классификацию лёссовых пород по этому показателю целесообразно и необходимо использовать при общей оценке просадочности грунтов, назначении объема лабораторных и полевых испытаний, выборе противопросадочных мероприятий, решении практически всех вопросов проектирования и устройства оснований и фундаментов.



Начальное просадочное давление ( $P_{sp}$ ) представляет собой то минимальное давление, при котором в условиях полного водонасыщения начинается реализация просадочных свойств лёссовой породы, т.е. проявляется просадка. В.И. Крутов (1982), введший этот показатель, подчеркивал, что по “своей сущности это давление, нарушающее природную структурную прочность грунта в водонасыщенном состоянии, в результате чего фаза нормального уплотнения переходит в фазу просадки, сопровождающуюся перестройкой структуры грунта и интенсивным уплотнением” (с. 131). И далее: “Из определения начального просадочного давления следует, что величина его должна приниматься при значении относительной просадочности, близком к нулю. Однако исследования показали, что за величину начального просадочного давления по результатам компрессионных испытаний целесооб-

разно принимать давление, при котором относительная просадочность  $\delta_{пр}$  равна 0,01, т.е. той же величине,

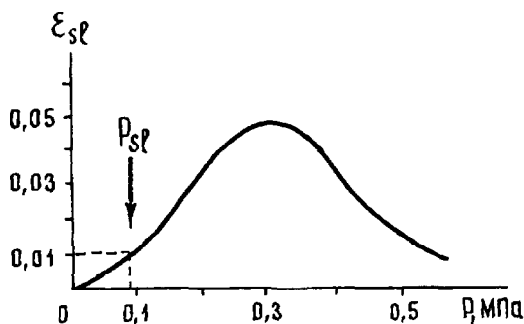


Рис. 3. Зависимость коэффициента относительной просадочности от давления и начальное просадочное давление

ниже которой грунты считаются непросадочными”. Именно такая позиция была закреплена в 1975 г. в СНиП II-15-74. Суть ее хорошо иллюстрируется на рис. 3.

Величина начального просадочного давления лёссовых пород Северной Евразии составляет 0,02—0,3 МПа. В большинстве районов этой территории она изменяется от 0,08 до 0,12 МПа. В предгорных районах Средней Азии, Северном Предкавказье значение этого показателя нередко снижается до 0,02—0,06 МПа, что обуславливает просадку толщи лёссовых пород от собственного веса с глубин 1—3,5 м.

Начальное просадочное давление широко используется в практике инженерной геологии, проектирования и строительства для расчета возможных величин просадок толщ лёссовых пород под действием собственного веса и дополнительной нагрузки от сооружений, для определения расчетного давления на просадочный грунт, при котором просадка его будет отсутствовать; определения величины деформируемой зоны, в пределах которой

происходит просадка грунта от нагрузки фундаментов, определения глубины, начиная с которой происходит просадка грунта от собственного веса на площадках со II типом грунтовых условий и в целом ряде других ситуаций.

*Начальная просадочная влажность* лёссовых пород, по В.И. Крутову, представляет собой влажность, при которой просадочные грунты, находящиеся под давлением собственного веса их толщи или дополнительного давления сооружения, начинают проявлять просадку. Практически за этот показатель принимает минимальное значение влажности, при котором под действующим давлением формируется относительная просадочность, равная 0,01.

Начальная просадочная влажность — величина переменная и определяется как свойствами лёссовой породы, так и характером внешнего воздействия на нее. Так, она уменьшается по величине с увеличением давления на грунт и, наоборот, увеличивается при росте плотности скелета грунта, а также его сопротивления сдвигу в водонасыщенном состоянии.

По данным В.И. Крутова, введшего этот показатель, начальное просадочное давление используется для определения возможности проявления просадки лёссовых грунтов от собственного веса при повышении влажности до состояния неполного водонасыщения, для установления зависимости относительной просадочности от степени повышения влажности.

*Мощность (величина) просадочной толщи лёссовых пород* представляет собой величину той части их разреза в метрах, в пределах которой проявляются просадочные свойства лёссовых пород при действующей нагрузке. Численное значение этой величины зависит от величины нагрузки и достигает наибольших значений (до 35—40 м и более) при действии собственного веса пород и дополнительной нагрузки.

*Суммарная, или полная, просадка толщи лёссовых пород ( $S_{sl}$ )* — максимальная величина просадки, которая формируется при реализации просадочных свойств при замачивании под действием собственного веса пород и дополнительной нагрузки от сооружения. В общем случае этот показатель рассчитывается по формуле

$$S_{sl} = S_{sl_p} + S_{sl_g} = \sum_{i=1}^n \varepsilon'_{sl_i} h_i m + \sum_{i=1}^k \varepsilon'_{sl_i} h_i,$$

где  $S_{sl_p}$  — просадка лёссовых грунтов основания от нагрузки сооружения, происходящая при замачивании лёссовых пород в

пределах так называемой деформируемой зоны (просадка происходит под совместным действием нагрузки от сооружения и собственного веса грунта толщи);  $S_{sl_g}$  — просадка от собственного веса грунта в зоне, располагающейся в нижней части просадочной толщи;  $\varepsilon'_{sl_i}$  — относительная просадочность лёссового грунта  $i$ -го слоя, определенная при его полном водонасыщении при давлении, равном сумме природного давления (от собственного веса) и дополнительного давления от сооружения в середине рассматриваемого слоя;  $h_i$  — толщина (мощность) того же слоя;  $m$  — коэффициент условий работы основания, принимаемый по действующим нормативным документам;  $\varepsilon''_{sl_i}$  — относительная просадочность лёссового грунта  $i$ -го слоя, определенная при его полном водонасыщении при давлении, равном природному давлению в середине рассматриваемого слоя;  $n$  — число слоев, на которые разбита деформируемая зона,  $k$  — число слоев в нижней части просадочной толщи (за пределами деформируемой зоны).

Более подробно методика расчета суммарной просадки толщи лёссовых пород изложена В.И. Крутовым (1982) и целом ряде нормативов (СНиП П-15-74; СНиП 2.02.01-82) и пособий (Пособие по проектированию..., 1986). Здесь лишь отметим, что величина этого показателя изменяется в широком диапазоне и может достигать 2—3 м. Количественная величина рассматриваемого показателя используется для подразделения толщ лёссовых пород на ряд категорий. Одним из первых такую классификацию предложили Ю.М. Абелев и М.Ю. Абелев (1968). Ими выделены три (по существу четыре) категории толщ лёссовых пород:

*I категория:*  $S_{sl} < 15$  см — толща оценивается как практически устойчивая при последующем замачивании грунта;

*II категория:*  $15 \text{ см} < S_{sl} < 50$  см — толща оценивается как малопросадочная при последующем замачивании;

*III категория:*  $50 \text{ см} < S_{sl} < 100$  см — толща оценивается как просадочная; при  $S_{sl} > 100$  см толща оценивается как сильно-просадочная.

Установив принадлежность толщи пород к той или иной категории, проектировщик может определить объем мероприятий, осуществление которых должно ликвидировать возможность вредного влияния доуплотнения пород при замачивании.

### Типы грунтовых условий массивов лёссовых пород по просадочности

Этот вопрос мы уже, по существу, затронули, приведя классификацию Ю.М. Абелева и М.Ю. Абелева. Однако в нормативных документах, начиная со СНиП П-Б.2-62, принято несколько иное подразделение толщ лёссовых пород по просадочности. В этом документе, а также во всех последующих строительных нормах и правилах (СНиП П-15-74; СНиП 2.02.01-83) было принято в зависимости от возможности проявления просадки лёссовых грунтов от собственного веса двучленное подразделение:

*I тип грунтовых условий по просадочности* — просадка происходит в пределах деформируемой зоны основания от нагрузки фундамента или другой внешней нагрузки, а *просадка от собственного веса грунта практически отсутствует или не превышает 5 см*;

*II тип грунтовых условий по просадочности* — возможна *просадка грунта от его собственного веса, превышающая 5 см* и происходящая преимущественно в нижней части просадочной толщи, а при наличии внешней нагрузки — просадка и в пределах деформируемой зоны.

Изыскание и проектирование сооружений велось долгие годы исходя из этого нормативного положения. Однако опыт строительства и эксплуатации зданий и сооружений показывал, что механизм и закономерности развития просадочных деформаций значительно более сложные и многообразные, чем принятые ранее в нормативной и технической литературе. “В частности, в действующих нормативных документах, а также при инженерно-геологических изысканиях, проектировании и строительстве недостаточно или совсем не учитываются следующие важнейшие факторы:

- а) неизбежное повышение напряженного состояния в массиве грунтов при застройке территорий за счет устройства планировочных насыпей, повышения влажности, уплотнения грунтов при ликвидации их просадочных свойств и устройстве обратных засыпок котлованов, применения фундаментов из забивных и набивных свай, устройства фундаментов под оборудование и полов, постоянной и временной нагрузок и т.п.;
- б) дополнительные осадки подстилающих просадочную толщу грунтов, возникающие при повышении нагрузок на них;

- в) изменение под влиянием вышеперечисленных факторов величины просадочной толщи;
- г) остаточная просадочность грунтов при подъеме уровня подземных вод и длительность процессов просадки грунтов от собственного веса и др.

Под влиянием перечисленных выше факторов в толщах просадочных лёссовых грунтов возможна IV зона деформации” (Крутов, 1998, с. 60—61).

IV зона — зона дополнительных осадок подстилающих просадочную толщу сжимаемых непросадочных, в том числе “условно просадочных”, грунтов. Эта зона, “ранее никак не учитываемая, обычно проявляется в случаях:

- когда просадочная толща подстилается водонасыщенными пылевато-глинистыми, в том числе лёссовыми грунтами;
- устранения просадочных свойств грунтов предварительным замачиванием, в том числе с гидровзрывом;
- подъема уровня подземных вод в пределах слоев сжимаемых грунтов;
- наличия современного или древнего орошения и т.п.

Величины дополнительных осадок  $S_{\sigma}$  могут быть весьма существенными и, например, за последние 25—40 лет по г. Никополью достигают 20—40 см, а по г. Запорожью — 15—25 см” (Крутов, 1998, с. 61—62).

С учетом этих положений В.И. Крутовым (1998) предложена новая классификация толщ лёссовых пород по просадочности, приведенная в табл. 3. Приведем характеристику содержания всех выделенных категорий грунтовых условий в авторском изложении с учетом данных рис. 4, а—е.

“IA — подтип грунтовых условий (рис. 4, а), в которых полностью исключаются просадка грунтов от собственного веса  $S_{slg} = 0$  и дополнительная осадка  $S_{\sigma} = 0$  от дополнительных напряжений, вызванных застройкой территорий, и возможна лишь просадка грунта от нагрузки фундаментов в пределах деформируемой зоны. К этому подтипу обычно относятся участки залегания слабо- и реже среднепросадочных лёссовых грунтов с начальным просадочным давлением  $P_{sl} > 0,1$  МПа, просадочной толщиной  $H_{sl} < 5—7$  м, подстилаемых прочными и малосжимаемыми грунтами, а также сильносжимаемыми грунтами при отсутствии дополнительной нагрузки на них.

IB — подтип грунтовых условий (рис. 4, б), в которых, наряду с просадкой от нагрузки фундаментов  $S_{slp}$  возможна про-

Таблица 3

Классификация толщ лёссовых грунтов  
по просадочности

Тип и подтипы грунтовых условий	Основные показатели		Дополнительные показатели (ориентировочные значения)			
	просадка от собственного веса $S_{sl}$ , см	дополнительная осадка подстилающего слоя $S_{\sigma}$ , см	начальное просадочное давление $P_{sl}$ , МПа	величина просадочной толщи $H_{sl}$ , м	дополнительные напряжения $\sigma_{ad}$	вид подстилающего слоя
IA	—	—	$> 0,1$	$< 6$	$< 0,5\sigma_{\Sigma}$	П.М
IB	$< 5$	—	$< 0,1$	$> 6$	$< 0,5\sigma_{\Sigma}$	П.М
IV	$< 5$	$> 5$	$< 0,1$	$> 6$	$> 0,5\sigma_{\Sigma}$	М
					$< 0,5\sigma_{\Sigma}$	С
IIA	5—20	—	$> 0,08$	$< 12$	$< 0,5\sigma_{\Sigma}$	П.М
PIB	$> 20$	—	$< 0,05$	$> 12$	$< 0,3\sigma_{\Sigma}$	П.М
PIV	$> 20$	$> 5$	$< 0,08$	$> 12$	$> 0,5\sigma_{\Sigma}$	М
					$< 0,3\sigma_{\Sigma}$	С

Примечания: 1.  $\sigma_{\Sigma}$  — вертикальные напряжения от собственного веса грунта при полном водонасыщении ( $S_r = 1,0$ ) без учета планировочной насыпи. 2. Степень сжимаемости подстилающих просадочную толщу грунтов: П — прочные, практически несжимаемые (модуль деформации  $E > 40$  МПа); М — мало- и среднесжимаемые ( $E = 40-10$  МПа), С — слабые, сильносжимаемые ( $E < 10$  МПа).

садка от собственного веса грунта величиной до  $S_{sl} \leq 5$  см, а дополнительная осадка подстилающего слоя практически отсутствует. Эти грунтовые условия чаще всего характеризуются наличием слабо- и реже среднепросадочных грунтов с начальным просадочным давлением  $P_{sl} > 0,1$  МПа, величиной просадочной толщи  $H_{sl} > 5-7$  м. Дополнительные осадки обычно отсутствуют при прочных и малосжимаемых подстилающих грунтах, а также при низких значениях дополнительных нагрузках на них.

IV — подтип грунтовых условий (рис. 4, в) характеризуется возможностью просадок грунтов не только от нагрузок фундаментов, но и от собственного веса  $S_{sl}$  и дополнительных осадок  $S_{\sigma}$  величиной более 5 см. На участках с этим подтипом обычно залегают слабо- и среднепросадочные лёссовые грунты с начальным просадочным давлением  $P_{sl} < 0,1$  МПа, величиной просадочной толщи  $H_{sl} > 5-7$  м. Дополнительные осадки вызываются вследствие значительной дополнительной нагрузки, особенно при устройстве планировочных насыпей, даже при мало-

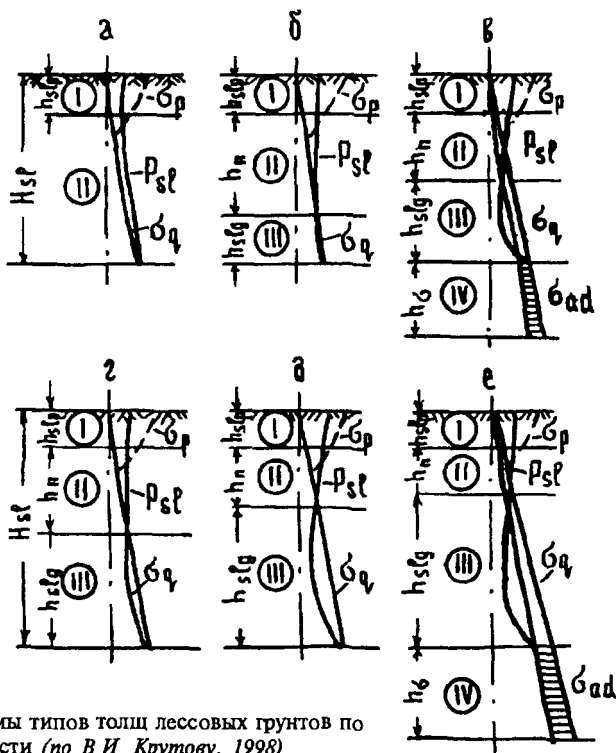


Рис 4 Схемы типов толщ лессовых грунтов по просадочности (по В И Крутову, 1998)

а—в и г—е — соответственно I и II типы грунтовых условий по просадочности (а — IA, б — IB, в — IB, г — IIA, д — IIB, е — IIB) I — деформируемая зона в основании от нагрузки фундаментов, II — нейтральная зона, III — зона просадки грунта от собственного веса, IV — зона дополнительных осадок подстилающих просадочную толщу грунтов  $H_{sl}$  — просадочная толща,  $h_{sp}$  — толщина деформируемой зоны,  $h_n$  — толщина нейтральной зоны,  $h_{sg}$  — толщина зоны просадки от собственного веса,  $h_g$  — толщина сжимаемой зоны подстилающих грунтов,  $\sigma_p$  — вертикальные напряжения от (внешней) нагрузки фундаментов,  $\sigma_q$  — вертикальные напряжения от собственного веса грунта,  $\sigma_{ad}$  — дополнительные вертикальные напряжения в массиве грунта,  $P_{sl}$  — начальное просадочное давление

сжимаемых подстилающих грунтах либо при относительно небольших дополнительных нагрузках на слабых подстилающих грунтах.

IIA — подтип грунтовых условий (рис. 4, г), в которых помимо просадки грунтов от внешней нагрузки в пределах деформируемой зоны возможна в нижней части просадочной толщ просадка грунтов от их собственного веса величиной 5–20 см, а дополнительные осадки подстилающих слоев практически отсутствуют. К этому подтипу чаще всего относятся участки залегания слабо-, средне-, и реже сильнопросадочных лессовых грунтов с начальным просадочным давлением  $P_{sl} < 0,08$  МПа,

просадочной толщей  $H_{sl} < 12$  м, подстилаемых прочными и малосжимаемыми грунтами либо сильносжимаемыми, но при отсутствии (или незначительной) дополнительной нагрузки на них.

ПБ — подтип грунтовых условий (см. рис. 4, д), характеризующийся возможностью проявления просадок как от нагрузки фундаментов, так и от собственного веса грунтов величиной  $S_{\sigma} > 20$  см при практически полном отсутствии дополнительной осадки в подстилающем слое.

ПВ — подтип грунтовых условий (см. рис. 4, е) включает в себя возможность развития просадок от нагрузки фундаментов, собственного веса грунтов, а также дополнительных осадок величиной  $S_{\sigma} > 5$  см в подстилающем слое от дополнительных вертикальных напряжений.

Подтипы ПБ и ПВ грунтовых условий обычно характеризуются залеганием сильно- и чрезвычайнопросадочных грунтов (иногда среднепросадочных) с начальным просадочным давлением  $P_{sl} < 0,08$  МПа, величиной просадочной толщи  $H_{sl} > 12$  м. Дополнительные осадки при подтипе ПВ вызываются под влиянием тех же факторов, что и в грунтовых условиях подтипа ПБ, но, как правило, более часто и в значительно больших размерах.

Предлагаемое подразделение каждого из принятых ниже типов грунтовых условий на три подтипа основывается на более полном учете требований действующих нормативных документов по проектированию и строительству на просадочных лёссовых грунтах новых результатов по изучению механизма и закономерностей развития просадочных деформаций грунтов, особенностей работы проектировщиков и строителей в рыночных условиях.

Для грунтовых условий с I типом по просадочности в качестве критериев приняты:

- 1) полное отсутствие просадки грунтов от собственного веса ( $S_{slg} = 0$ ), когда при проектировании любых видов оснований и конструкций фундаментов, а также зданий и сооружений просадки грунтов от собственного веса никак не учитываются;
- 2) величины просадок грунтов от их собственного веса, не превышающие 5 см ( $S_{slg} < 5$  см), что для подавляющего большинства зданий и сооружений, видов оснований вполне допустимо и дополнительно учитывается только при проектировании свайных и некоторых других видов фундаментов;



- 3) величины дополнительных осадок  $S_{\sigma}$  подстилающих просадочную толщу грунтов от дополнительных нагрузок, которые при  $S_{\sigma} < 5$  см для большинства зданий и сооружений являются вполне допустимыми, так как проявляются обычно на больших площадях и достаточно равномерно. В этих случаях они должны учитываться в основном при проектировании свайных фундаментов. Дополнительные осадки величиной  $S_{\sigma} > 5$  см следует учитывать, так же как и просадки грунтов от их собственного веса.

В качестве дополнительных критериев для грунтовых условий с II типом по просадочности приняты:

- 1) предельно допустимые в соответствии с действующими нормативными документами величины просадок грунтов от их собственного веса ( $S_{sg} < 20$  см), при которых во многих случаях допускается строительство различных зданий и сооружений без устранения просадочных свойств грунтов, применение полного комплекса водозащитных и конструктивных мероприятий или ограничивается область применения различных методов уплотнения грунтов, конструкций фундаментов и т.п.;
- 2) величины дополнительных осадок подстилающих просадочную толщу грунтов от дополнительных нагрузок по аналогии с подтипом IB  $S_{\sigma} < 5$  см или  $S_{\sigma} \geq 5$  см.

Предлагаемая классификация толщ лёссовых грунтов на отдельные подтипы позволяет более полно при проектировании и строительстве учитывать особенности и закономерности развития просадочных деформаций. Благодаря этому достигаются более обоснованный выбор наиболее эффективных противопросадочных мероприятий, а также проектирование оснований и фундаментов" (Крутов, 1998, с. 62—64).

#### 1.4.

### Закономерности распространения лёссовых пород и их просадочность

**Распространение лёссовых пород в пределах континентов Земли.** Лёссовые просадочные и непросадочные породы имеют широкое распространение в самой верхней, "покровной" части разреза литосферы Земли. Представлены они главным образом четвертичными континентальными образованиями разного генезиса.

По подсчетам Э.В. Кадырова (1979, 1990), этими породами покрыто 4 255 600 км<sup>2</sup> поверхности континентов Земли, что сос-

твляет 3,2% площади суши нашей планеты. Близкие данные получены сотрудниками кафедры инженерной и экологической геологии Московского университета им. М.В. Ломоносова: 4 258 990 км<sup>2</sup> и 3,3% соответственно. Несколько более высокие цифры — 4 351 380 км<sup>2</sup> и 3,9% — получены В.П. Ананьевым.

Лёссовые породы формируют покров на всех континентах, за исключением Антарктиды. Они образуют специфическую фрагментарную, дырчатую оболочку литосферы Земли. В Европе и Азии лёссовые породы развиты наиболее широко; они занимают почти 67,5% общей площади лёссовых пород Земли. В Европе эти породы покрывают наибольшую относительную площадь по сравнению с другими континентами.

Самые западные достаточно крупные массивы лёссовых пород *Европы* расположены во Франции. Южнее, на территории Северной Испании, развиты лишь красноватые лёссовидные, существенно глинистые породы. В Англии лёссовые породы имеют ограниченное распространение. К востоку от Франции территория развития лёссовых пород расширяется. От островного распространения и обычно лёссовидного облика в северной и западной частях Европы постепенно они переходят в действительно крупные массивы в предгорьях Среднегерманских гор. Далее на восток Европы в центральной ее части их мощность, площадь распространения, степень однородности и лёссовый облик возрастают, прерываясь местами речными долинами и горными зонами. Наиболее мощные полигенные их толщи (обычно до 15—20 м с 3—4 горизонтами ископаемых почв) распространены в межгорных впадинах, особенно в бассейнах рек Дуная, Рейна, Роны и Моравии, где они покрывают солидные по площади районы Германии, Болгарии, Венгрии, Чехии, Словакии, Румынии и республик бывшей Югославии. Островами они распространены на территориях Швейцарии, Австрии и Италии (долина р. По и предгорья Альп).

Прерывистый, участками островной характер распространения лёссовых пород в Западной и Центральной Европе переходит в сплошной лёссовый покров в Восточной Европе. В пределах Восточно-Европейской равнины лёссовые породы распространены от юга Польши до Заволжья. Они повсеместно покрывают Среднюю и Южную Украину, а также Предкавказье. Острова лёссовых пород встречаются в Белоруссии, Брянской, Орловской, Курской и Смоленской областях России, в бассейне верхнего течения Дона, в Среднем и Нижнем Поволжье.

*Азия* считается классической страной распространения лёссовых пород. Наиболее мощные и типичные просадочные лёссы распространены в Центральной, Средней Азии и Китае. Здесь

ими покрыто 1 449 750 км<sup>2</sup> континентальной поверхности, что составляет несколько более 34% от площади лёссовых пород Земли. Небольшие участки распространения лёссовых пород имеются на юго-востоке Монголии и в северных частях Индии, Афганистана и Ирана, в Закавказье, Израиле. На севере Азии они прерывистой полосой простираются почти от Урала до Байкала по югу Сибири.

В Азии развиты лёссовые породы различного генезиса. Здесь широко распространены эоловые, так называемые типичные, лёссы. Во многих регионах развиты лёссовые образования эолово-водного (чаще всего эолово-пролювиальные и эолово-делювиальные) и водного (аллювиальные, пролювиальные, делювиальные, озерно-аллювиальные и др.) происхождения. Четко проявляется территориальная близость массивов лёссовых пород и эоловых песков пустынь Восточной и Северо-Восточной частей Китая и всей зарубежной Азии.

*В Северной Америке* лёссовые породы преимущественно распространены в пределах Великих равнин США в бассейне рек Огайо-Миссури-Миссисипи в центре США. Два участка меньшей площади и с меньшей мощностью этих образований встречаются в бассейне рек Снейк-Колумбия в северо-западной части США.

*В Южной Америке* лёссовые породы распространены широко на территории Аргентины и в ряде районов Уругвая. Они описаны в бассейне рек Парана-Парагвай и предгорьях Анд.

*В Африке и Австралии* крупные лёссовые массивы практически отсутствуют. В Африке лишь небольшие их поля встречаются в разных его частях, особенно на его юге. Большие участки их имеются в Новой Зеландии.

Лёссовые породы везде обычно залегают в виде покровного чехла на террасовых поверхностях и предгорных равнинах в местах перехода от низменностей или плато к горам. Верхняя граница распространения лёссовых пород в Среднегерманских горах и Карпатах достигает до абсолютной высоты 400—600 м, на Северном Кавказе — 1300—1500 м. Наиболее высокую отметку распространения они имеют в Центральной и Средней Азии. Здесь зона сплошного распространения лёссовых пород достигает в северном склоне Туркестанского хребта до 800 м, в юго-западных склонах Чаткальского и Ферганского хребтов соответственно до 1700 и 2200 м. Выше указанных отметок в Тянь-Шане и Памире лёссовые породы слагают лишь небольшие разрозненные участки, прослеженные до высот 3000—4500 м.

Подстилаются лёссовые породы породами различного состава и возраста. На равнинах они обычно залегают на поверхнос-

ти глинистых, песчаных и галечниковых отложений четвертичного и редко неогенового периода, а в горной зоне — осадочными, магматическими и метаморфическими породами разнообразного состава от четвертичного возраста до палеозоя включительно. Вблизи лёссовых массивов обычно распространены золотые пески.

В Западной и Центральной Европе и центральных районах Русской равнины, где лёссовые породы имеют островной характер распространения, их мощность изменяется в пределах 1—20 м, на территориях сплошного распространения — доходит до 40—60 м. В низовьях Дуная их мощность достигает 80 м и более. Наиболее мощные толщи (100—150 м и более) лёссовых пород распространены в предгорьях Средней и Центральной Азии, в Китае.

Наблюдается определенная зависимость мощности описываемых пород от элемента рельефа, который они формируют. Обычно наиболее мощные циклично построенные толщи лёссовых пород залегают на водораздельных равнинах и платообразных возвышенностях. На склонах и по мере снижения уровней террасовых поверхностей их мощность уменьшается и достигает минимума на первой надпойменной террасе. В одних и тех же регионах наиболее мощные лёссы, по Э.В. Кадырову, залегают в предгорьях и на склонах гор, ориентированных к воздушным течениям.

**Распространенность лёссовых пород в различных климатических поясах Земли.** Распространенность лёссовых пород и их просадочность тесно связаны с климатом. По мнению Н.И. Кригера, просадочные лёссы распространены преимущественно в семиаридных районах, в пределах которых радиационный баланс не превышает 50 ккал/см<sup>2</sup> в год, а радиационный индекс сухости составляет 1—3.

Специальные исследования Э.В. Кадырова показали, что лёссовые породы развиты в разных климатических поясах. Площади их распространения распределены следующим образом: в умеренном поясе — 80,0%, в субтропическом — 16,8 и тропическом — 3,2%. При этом в субтропическом и тропическом поясах лёссовые породы залегают в основном в Южной Америке, где распространено почти 85% лёссовых массивов этого континента. Они также отмечены и в Африке.

В Евразии более 98% площади распространения лёссовых пород расположено в умеренном по атмосферному увлажнению поясе. При этом в Европе они по ландшафтным зонам распределены так: в лесной 33,2%, лесостепной — 26,7, степной — 39,0 и полупустынной — 1,1%, а в Азии соответственно 11,9; 28,3;

40,8 и 16,3% (включая пустыни) от общей площади, занятой лёссовыми породами этих континентов. В целом лёссовые породы на поверхности Земли имеют наиболее широкое распространение в лесостепной и степной зонах, которые характеризуются умеренным климатическим увлажнением. В этой зоне увлажнения расположено 61,2% лёссовых массивов. По мере увеличения и уменьшения степени климатического увлажнения площадь распространения этих пород резко снижается. В зонах избыточного и ничтожного увлажнения, куда обычно относится таежная зона, арктический пояс и экстрапустыни, лёссовые породы, как правило, отсутствуют.

**Лёссовые породы Северной Евразии и их просадочность.** В пределах Северной Евразии, рассматриваемой здесь в границах стран содружества независимых государств (СНГ) лёссовые породы развиты очень широко. На Русской равнине они покрывают территории от Польши до Урала. Почти полностью покрыты лёссовым чехлом Средняя и Южная Украина, Предкавказье. Обширные массивы лёссовых пород имеются в Белоруссии, в центральных районах и на юго-востоке (бассейн нижнего Дона, Среднее Поволжье). Лёссовые породы большой мощности имеются в Средней Азии. Они широко представлены на равнинах Южной Сибири (Лёссовые породы..., 1986).

Кроме того, лёссовые отложения встречаются на Туранской плите, в горно-складчатых областях Закавказья, в Забайкалье, на Дальнем Востоке, в пределах Камчатской межгорной впадины. Чаще всего это маломощные четвертичные элювиально-делювиальные, делювиально-пролювиальные покровы, сложенные лёссовидными породами непросадочными либо просадочными при дополнительных нагрузках.

На равнинных и платообразных территориях Северной Евразии в целом с севера на юг прослеживается широтная зональность в распространении лёссовых пород. Анализ и обобщение регионального материала позволили выделить три группы крупных зон: Северную, Центральную и Южную.

*В Северной*, приуроченной к таежной зоне и территории распространения ледниковых отложений на Русской равнине (в пределах развития отложений валдайского, московского и местами днепровского оледенения), а также озерно-аллювиальных отложений в Западной Сибири, характерно островное распространение маломощных (до 5 м, иногда несколько больше), чаще всего верхнеплейстоценовых отложений с лёссовым обликом. В Западной Сибири в этой зоне лёссовые породы приурочены к хорошо дренированным, в основном узким приборочным участкам террас. Именно здесь мощность лёссовой толщи

может достигать 8—10 м на высоких террасах; однако с удалением от бровки террас породы быстро теряют лёссовидный облик. На большей части описываемой зоны лёссовые породы непросадочные. В тех же случаях, когда лёссовидные супеси и суглинки проявляют просадочность при дополнительных нагрузках, мощность их обычно мала, а суммарная просадка составляет менее 5 см.

Таким образом, толща лёссовых пород Северной зоны мало-мощна, состоит из одного циклита; для породы характерна лишь невысокая просадочность при дополнительных нагрузках, которая закономерно уменьшается с глубиной.

*К Центральной зоне* распространения лёссовых пород относится более обширная территория. Ее площадь на Русской равнине расположена к югу от границы московского оледенения вплоть до границ развития максимального днепровского оледенения. В Западной Сибири в нее входит юг Обь-Иртышской и Обь-Енисейской плиоцен-среднеплейстоценовых аллювиально-озерных равнин. В этих областях в пределах зоны широколиственных лесов, частично лесостепей прослеживается на севере прерывистое и на юге сплошное распространение средне- и верхнеплейстоценовых лёссовых отложений мощностью 5—10 м, на юге местами до 15 м. Подстилаются лёссовые толщи разнообразными по возрасту, генезису и литологическому составу породами: от дочетвертичных до четвертичных — ледниковых, водно-ледниковых, аллювиальных и других отложений. На большей площади Русской плиты они подстилаются ледниковыми и водно-ледниковыми отложениями. В пределах днепровского языка оледенения установлено, что толща лёссовых пород делится мореной на надморенную и подморенную части.

В разрезах лёссовых пород нередко прослеживаются четко выраженные ископаемые почвы. Их число увеличивается в южном направлении и на более древних элементах рельефа (если лёссовый комплекс является рельефообразующим). В полных разрезах обычно прослеживаются два-три лёссовых циклита, каждый из которых включает в себя погребенную или современную почву лёссовых и лёссовидную породу.

В рассматриваемой зоне преобладают породы, просадочные при дополнительных нагрузках; мощность просадочной толщи до 7—9 м, редко более. Наибольшее ее значение отмечается на хорошо дренированных присклоновых участках террас и в южных районах зоны. Исключение составляют территории Приднепровской части Украины и Чебоксарского Поволжья, где отмечены просадочные при дополнительной нагрузке толщи мощностью до 15 м. Просадки при дополнительных нагрузках мо-

гут достигать 10—15 см, на отдельных участках даже несколько выше.

Для территории этой зоны в целом характерна общая тенденция затухания просадочных свойств лёссовых пород с глубиной. Однако в пределах просадочных толщ, особенно циклично построенных, снижение просадочности не всегда происходит в прямолинейной зависимости. Особенно это проявляется при наличии двух или трех лёссовых циклитов в разрезе толщ.

Для Центральной зоны в целом характерен первый тип грунтовых условий по просадочности. Второй тип грунтовых условий по просадочности встречается здесь участками только в южных районах, в пределах так называемого языка распространения морены днепровского оледенения.

В Южной зоне, включающей области европейской части Северной Евразии за пределами развития материковых оледенений и юга Западной Сибири в ландшафтах степей и полупустынь, широко распространены мощные (местами до 40—60 м и более) просадочные лёссовые породы (табл. 4). Среди них встречаются горизонты отложений всех отделов четвертичной системы. Лёссовые отложения подстилаются разными по генезису, возрасту и литологическому составу породами.

Таблица 4

Максимальные значения коэффициента  
относительной просадочности лёссовых пород  
в различных районах СНГ при нагрузке 0,3 МПа  
(по Ю.М. Абелеву и М.Ю. Абелеву, 1968)

Пункт	Коэффициент относительной просадочности	Пункт	Коэффициент относительной просадочности
Одесса	0,05—0,015	Грозный	0,067—0,12
Херсон	0,05—0,09	Нальчик	0,044—0,08
Никополь	0,056—0,122	Сумгаит	0,041—0,099
Днепропетровск	0,034—0,08	Петропавловск	0,03—0,06
Запорожье	0,07—0,11	Чимкент	0,05—0,10
Кременчуг	0,04—0,08	Алма-Ата	0,03—0,07
Пенза	0,044—0,109	Тюмень	0,045—0,085
Саратов	0,04—0,083	Барнаул	0,045—0,095
Куйбышев (Самара)	0,04—0,06	Новосибирск	0,03—0,08
Волжский	0,04—0,08	Кемерово	0,03—0,09
Ростов-на-Дону	0,04—0,06	Красноярск	0,04—0,08
Таганрог	0,043—0,074		

Для территории развития четвертичных морских трансгрессий юга Русской плиты характерны островные и прерывистые покровы лёссовых пород с небольшой мощностью просадочной толщи (до 5 м, реже более). В отдельных районах Нижнего Поволжья вскрыты просадочные толщи под песчано-глинистыми морскими хвалынскими отложениями.

В поздне- и среднеплейстоценовых толщах выявлены мощные горизонты лёссовых пород, разделенные хорошо выраженными на больших площадях ископаемыми почвами. Именно в этих областях чаще всего встречаются циклично построенные толщи, и обычно в разрезах прослеживаются 3—4 циклеса, каждый из которых обычно тождествен одному из возрастных горизонтов плейстоцена. В полных разрезах толщи представлены всеми горизонтами плейстоцена с выдержанными по простиранию погребенными почвами (в разрезе Приобского плато в лёссовой толще, представленной отложениями красnodубской свиты, выделяется до 7—10 циклессов).

Для сложно (циклично) построенных лёссовых толщ просадочность с глубиной уменьшается, но эта общая закономерность осложняется в пределах каждого циклита и ее характер будет зависеть от генезиса как породы, так и ее просадочности. Для толщ лёссовых пород, залегающих на низких надпойменных террасах, характерны ациклическое строение и небольшая мощность, а также закономерное уменьшение просадочности с глубиной.

Для Южной зоны характерны просадочные толщи наибольшей мощности (до 20—40 м и выше), которые могут дать большие суммарные величины просадки под собственным весом и максимальные (до 50—100 см и более) при дополнительных нагрузках. Наибольшими мощностями просадочных толщ и величиной просадки (50—100 см и более) на Русской плите характеризуются лёссовые породы Восточного и Центрального Предкавказья, Причерноморской низменности, Приднепровской возвышенности (в пределах юго-восточной части Украинского кристаллического массива), Приднепровской, Запорожской и Приазовской равнин; в Западной Сибири — лёссовые породы Северного Казахстана и Приобского плато. Еще более мощные просадки могут дать лёссовые породы Средней Азии.

Для рассматриваемых областей характерны второй и первый типы грунтовых условий по просадочности. Большие просадки, кроме Центрального и Восточного Предкавказья, выявлены во многих районах Причерноморской равнины. Здесь величина просадки также может достигать 100 см и более.



Эти особенности южной зоны нарушаются на тех территориях, где развиты невысокие возвышенности и плато с неглубоким залеганием дочетвертичных отложений, например в пределах Донецкого кряжа, Приволжской, Вольно-Подольской и Ставропольской возвышенностей. В их пределах прослеживаются прерывистое распространение лёссовых пород небольшой мощности и постепенное увеличение их мощности к периферическим частям возвышенностей. В этом же направлении идет постепенное закономерное замещение маломощных горизонтов лёссовых пород с дресвой и щебнем на более однородные толщи, которые в периферических частях могут достигать значительной мощности (10—15 м, реже более).

Таким образом, для лёссовых пород Северной Евразии характерно закономерное увеличение с севера на юг их мощности, в разрезах появляются более древние — раннеплейстоценовые горизонты. При этом четко проявляются изменения и в распространении просадочных разностей лёссовых пород: для Северной зоны характерно преобладание непросадочных пород, а для Южной — просадочных толщ, достигающих наибольшей мощности, причем просадка существенно проявляется при природных давлениях.

Подчеркнем, что в пределах горно-складчатых регионов широтная зональность осложняется высотной поясностью в распространении и характере проявления просадочности лёссовых отложений. В горных областях выше абсолютных отметок 2000 м лёссовые отложения встречаются очень редко. Наибольшей мощности (30—100 м и более) они достигают на предгорных ступенях, адырах, ниже- и среднеплейстоценовых предгорных и межгорных равнинах. Эти мощные лёссовые толщи подстилаются песчаными, крупнообломочными, глинистыми и другими отложениями различного возраста, а в ряде мест — так называемым каменным лёссом.

Лёссовые породы таких регионов южной зоны отличаются наибольшей мощностью просадочной толщи, достигающей 20—30 м и более, и наибольшей величиной просадки. Эти территории отнесены преимущественно ко второму типу грунтовых условий. На средне-верхнеплейстоценовых предгорных равнинах, расположенных на более низких абсолютных отметках, мощность лёссовых отложений и просадочность толщ снижаются, а просадка нередко проявляется только при дополнительных нагрузках. Участки второго типа встречаются также широко, как и первого типа.

В разрезах лёссовых толщ отмечается наличие погребенных почв, часто они представлены мощными горизонтами — ком-

плексами. Они существенно влияют на изменение просадочности с глубиной, которое в разрезах различно и зависит от количества лёссовых циклитов в каждом конкретном разрезе и распределения просадочности в пределах каждого циклита.

## 1.5.

### **О максимальных мощностях просадочных толщ лёссовых пород**

В пределах Северной Евразии мощность просадочной толщи в разрезах лёссовых пород обычно не превышает 10—30 м. В подавляющем большинстве районов России, Украины и Казахстана она достигает 10—15 м (рис. 5). В ряде же районов Центральной Азии и в Предкавказье были установлены разрезы с более мощной просадочной зоной — до 35—40 м.

Н.И. Кригер (1989), обобщивший данные о просадочности толщи лёссовых пород и вертикальном строении циклитно построенных разрезов, отметил, что «в Средней Азии, Предкавказье, на Русской равнине и на юге Западной Сибири П<sup>1</sup> наблюдается в породах не ниже 1-й ископаемой почвы (возраста 20—25 тыс. лет, глубина кровли преимущественно от 10 до 20 м), реже не ниже 2-й ископаемой почвы (возраста 80—100 тыс. лет, глубина залегания кровли преимущественно от 20 до 35 м)».

Наиболее детально данные о пространственном распределении мощностей просадочной толщи лёссовых пород представлены на «Карте прогноза просадочности территории распространения лёссовых пород в СССР» масштаба 1:2 500 000 (1989). Однако на ней мощности просадочных толщ, превышающие 20 м, показаны без дальнейшей дифференциации, хотя именно они представляют наибольший интерес с обсуждаемой точки зрения.

**Литературные данные о максимальных мощностях толщ просадочных лёссовых пород.** В европейской части Северной Евразии максимальные мощности просадочной толщи лёссовых пород отмечены на юге Украины и в Предкавказье. В частности, в пояснительной записке к названной карте В.С. Быкова с соавторами отметили: «Однако следует указать, что во многих районах, например в Восточном Предкавказье (в районе г. Георгиевска и Алханчурской долины), в южном Таджикистане (в пределах выровненных пенепленов гор), на юге внеледниковых равнин в

---

<sup>1</sup> П — «настоящая просадочность», по Н.И. Кригеру (1989), — способность породы уплотняться при увлажнении в природном напряженном состоянии.

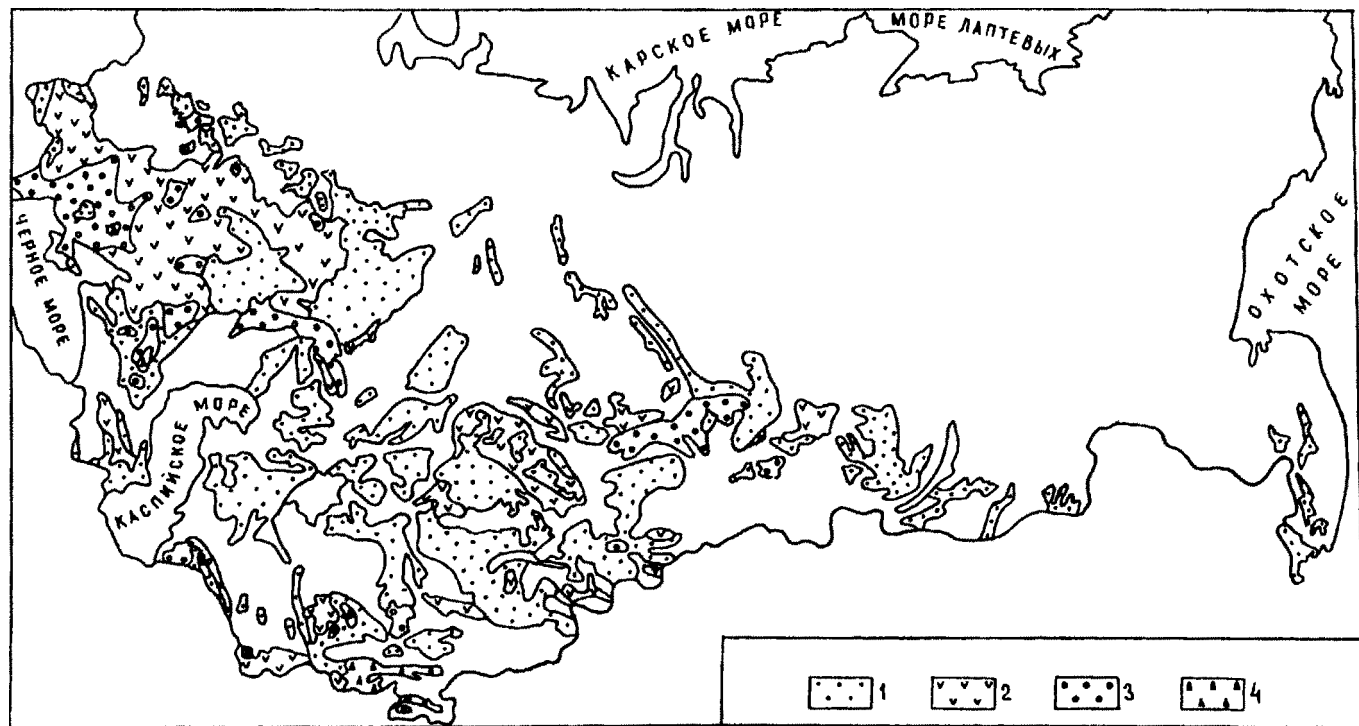


Рис. 5. Распределение преобладающих величин мощностей просадочной толщи лёссовых пород при нагрузке 0,3 МПа (или природной + 0,3 МПа). Составлена А.В. Ершовой и В.Т. Трофимовым на основе Карты прогноза просадочности территории распространения лёссовых пород СССР, масштаб 1:2 500 000.

1 — мощность просадочной толщи до 5 м, 2 — до 10 м, 3 — до 20 м, 4 — более 20 м

европейской части СССР (в районе городов Запорожья, Днепропетровска и др.) мощности просадочных лёссовых отложений достигают 30—40 м и более” (Пояснительная записка..., 1989, с. 8—9).

Еще большие величины просадочной толщи в разрезе лёссовых пород Восточного Предкавказья даются Б.Ф. Галаем (1992). По его оценкам, в пределах междуречных равнин Восточного и Северо-Восточного Ставрополя (Буденновск, Степное, Новозаведенное, Отказное) мощность просадочной толщи составляет 20—60 м.

Более обширны сведения об очень больших мощностях просадочной толщи в разрезах лёссовых пород Средней Азии. В частности, на ее западе они установлены в пределах Гяурского массива, где достигают 40 м (Актаев и др., 1985).

Районы с мощными сильнопросадочными толщами установлены в северо-восточной и восточной частях Каршинской степи. Они представляют собой “пролювиальную волнистую сильнорасчлененную равнину, сложенную пролювиальными лёссами карнабского комплекса<sup>1</sup>. К этому району преимущественно относятся водораздельные участки, расположенные отдельными полосами между долинами сухого русла Кумдарьи и Кашкардарьи. Мощность просадочной толщи доходит до 35—45 м” (Мавлянов и др., 1974, с. 220).

Интересные данные о больших мощностях просадочных толщ в Приташкентском районе опубликованы Э.В. Кадыровым (1979). В частности, максимальная мощность просадочной при природной нагрузке толщи лёссов оценивается им в 50 м и более. “Отдельные образцы с глубин 31—33 м в Приташкентском районе имели коэффициент относительной просадочности 0,07—0,1... По данным М.Ш. Шерматова (1971), лёссовидные породы у селения Заркент (Приташкентский район) на глубине 41 м имели коэффициент относительной просадочности 0,0572” (Кадыров, 1979, с. 137).

Мощные просадочные толщи установлены и в Гиссаро-Сурхандарьинской впадине. По данным Ж. Жумангулова (1982), массивы с просадочной зоной до 40 м сложены пролювиальными среднечетвертичными лёссовыми образованиями имакского комплекса, слагающими расчлененные глубокими саями и лощинами адаыры и высокие террасы.

Более обширные и, главное, конкретные сведения о мощных просадочных толщах лёссовых пород приводит Е.Н. Сквалецкий

---

<sup>1</sup> Возраст отложений этого комплекса среднечетвертичный.

(1987, 1987а) для территории Таджикистана. Им показано, что просадочны при природной нагрузке лёссовые породы трех верхних циклитов (до 3-й погребенной почвы) дюшамбинского комплекса (верхний плейстоцен). Мощность таких образований достигает 39—41 м на предгорных шлейфах и высоких террасах. Такие просадочные толщи установлены в пределах Яванской долины, плато Алимтай, Уртабоз и Ташрабад.

Несколько более высокие значения приводит для Яванской долины Н.И. Кригер с соавторами. “Исследования, проведенные на территории Яванской долины, показывают, что при влажности породы, соответствующей малоподвижному парагенетическому комплексу, мощность просадочной толщи может достигать 40—45 м” (Кригер и др., 1981, с. 75).

**Данные о максимальных мощностях просадочных толщ лёссовых пород, полученные при изучении опорных инженерно-геологических разрезов этих пород.** В течение 1986—1990 гг. ПНИИИСом Госстроя СССР, геологическим факультетом Московского университета им. М.В. Ломоносова, институтами АН СССР и академиями союзных республик, рядом вузов и территориальными изыскательскими организациями семи союзных республик была проведена разработка проблемы “Рациональное народнохозяйственное освоение (использование) территорий распространения просадочных образований”. Важнейшим блоком ее являлось инженерно-геологическое изучение опорных разрезов просадочных лёссовых грунтов СССР (Трофимов и др., 1989).

В ходе этих исследований были получены новые данные как о мощности толщ лёссовых пород, так и о мощности просадочной части разреза. Наибольшие их значения установлены на ключевых участках в Северо-Кавказском, Приташкентском и Южно-Таджикском районах. Максимальная мощность толщ лёссовых пород в единичном разрезе в Северном Предкавказье в районе ключевого участка “Отказное” превышает 100 м, а в Южно-Таджикской депрессии — 200 м. Мощность просадочных лёссовых пород также оказалась более высокой, чем считалось ранее. Так, в пределах ключевого участка “Отказное” максимальная ее величина существенно превысила 40 м при действии природной нагрузки. В Южно-Таджикской впадине на ключевом участке “Адырный” встречены столь же мощные просадочные толщи. Установление этого факта, как уже отмечалось ранее (Трофимов и др., 1989), — открытие в области инженерной геологии лёссовых образований. Однако оно до сих пор не получило какого-либо освещения в литературе. Восполним этот пробел.

Ключевой участок "Отказное" расположен в пределах Ставропольского края в районе пос. Отказное и охватывает участок долины р. Кумы и водораздельного плато этой реки с реками Мокрый Карамык и Горькая Балка. Абсолютные отметки колеблются от 246 до 156 м. Этот район является частью Терско-Кумской равнины, расположенной между двумя крупными геолого-структурными областями Предкавказья — Ставропольским поднятием на западе и Каспийской впадиной на востоке.

Исследования лёссовых отложений этого района, проведенные в 1986—1989 гг. В.И. Ботниковым, Б.Ф. Галаем, Ю.Б. Файнером, В.П. Ударцевым и другими геологами, показали, что максимальная мощность лёссовой толщи достигает почти 140 м. Она с размывом залегает на морских осадках акчагыла. В строении толщи обособляются два комплекса. Нижний из них, мощностью около 45 м, включает три циклита, каждый из которых включает горизонт пылеватых суглинков и горизонт буро-коричневых погребенных почв. Эта часть толщи, породы которой находятся в обратной намагниченности эпохи Матуяма, относятся В.П. Ударцевым к эоплейстоценовым отложениям. Они в настоящее время обводнены и с инженерно-геологических позиций должны рассматриваться как глинистые, а не лёссовые грунты (Трофимов, 1992).

Верхний комплекс мощностью около 90 м включает 9 плейстоценовых и голоценовых циклитов, содержащих, по данным В.П. Ударцева, 26 лёссовых и почвенных горизонтов, представленных пылеватыми супесями и суглинками (лёссами, лёссовидными суглинками, по классификации С.С. Морозова). Почти весь этот комплекс (верхние 80 м) относится, по данным палеомагнитных исследований, к зоне прямой полярности Брюнеса.

Наибольший интерес с инженерно-геологических позиций представляют материалы, полученные при изучении керна скважины С-1 глубиной 72 м, пробуренной СтавропольТИСИЗом на правом берегу р. Кумы в пределах междуречного плато у абсолютной отметки 245,55 м. Этой скважиной (до глубины 50 м) вскрыто пять лёссовых циклитов (рис. 6), верхний из которых венчается современным, а нижележащие — погребенными почвенными горизонтами (как правило, педокомплексами). Первый (верхний) из этих циклитов (мощностью 13,8 м) имеет голоценово-верхнеплейстоценовый возраст, второй (8,5 м) — верхнеплейстоценовый, третий (9,8 м) — верхне-среднеплейстоценовый, четвертый (9,9 м) и пятый (более 9 м) — среднеплейстоценовый возраст. Эти циклиты венчаются, по данным В.П. Ударцева, голоценовым педокомплексом, брянской плохо выраженной погребенной



Таблица 5

Просадочность и другие свойства лёссовых пород опорных разрезов  
 "Отказное" (скважина С-1) и "Буденновск" (скважина 100-М) Предкавказского региона

Скважина С-1						Скважина 100-М					
Глубина, м	Естественная влажность, %	Плотность скелета грунта, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Природная нагрузка, МПа	Относительная просадочность при природной нагрузке	Глубина, м	Естественная влажность, %	Плотность скелета грунта, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Природная нагрузка, МПа	Относительная просадочность при природной нагрузке
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1,0	11	1,41	47	0,015	0,001	2,2	6	1,50	44	0,040	0,002
1,5	7	1,30	51	0,031	0,000	5,5	14	1,50	44	0,110	0,005
2,5	8	1,41	48	0,046	0,060	7,8	10	1,46	46	0,155	0,043
3,5	9	1,44	47	0,061	0,039	11,8	10	1,58	41	0,225	0,060
4,5	9	1,43	47	0,075	0,058	15,0	8	1,55	42	0,300	0,059
5,5	10	1,46	46	0,090	0,054	20,0	8	1,53	43	0,400	0,039
6,5	9	1,38	48	0,105	0,045	25,2	6	1,56	42	0,505	0,038
7,5	10	1,47	45	0,120	0,064	29,5	7	1,69	37	0,590	0,039
8,5	10	1,44	47	0,136	0,089	33,0	9	1,76	34	0,660	0,001
9,5	11	1,41	47	0,151	0,067	38,2	8	1,46	46	0,765	0,034
10,0	12	1,41	47	0,167	0,072	42,5	6	1,47	45	0,850	0,046
11,0	11	1,47	45	0,183	0,029	44,0	9	1,72	36	0,880	0,014
12,0	11	1,52	43	0,200	0,065	44,3	9	1,81	32	0,882	0,010



Продолжение табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13,0	11	1,51	44	0,217	0,056	45,0	10	1,77	34	0,900	0,018
14,0	10	1,56	42	0,234	0,038	45,8	10	1,62	40	0,915	0,020
15,0	10	1,52	43	0,251	0,069	46,8	9	1,63	39	0,935	0,011
16,0	9	1,57	41	0,268	0,052	47,0	9	1,71	36	0,940	0,011
17,0	12,3	1,46	46	0,284	0,074	47,8	8	1,68	37	0,955	0,012
18,0	8	1,45	46	0,300	0,097	48,8	10	1,71	36	0,975	0,040
19,0	14	1,34	50	0,315	0,097	50,8	9	1,56	42	1,015	0,011
20,0	11	1,36	49	0,330	0,112	52,3	9	1,69	37	1,045	0,005
21,0	9	1,46	46	0,346	0,098	53,3	8	1,75	35	1,065	0,013
22,0	16	1,45	46	0,363	0,070	54,5	10	1,76	34	1,090	0,014
23,0	13	1,43	46	0,373	0,112	55,3	11	1,62	40	1,105	0,06
24,0	16	1,38	48	0,395	0,076	57,0	8	1,72	36	1,140	0,01
25,0	12	1,50	44	0,412	0,044	55,8	12	1,91	29	1,175	0,001
26,0	12	1,49	44	0,429	0,060	63,0	9	1,87	30	1,260	0,009
27,0	11	1,51	44	0,446	0,072	77,5	16	1,84	31	1,550	0,006
28,0	13	1,42	47	0,462	0,074	89,0	16	1,90	29	1,780	0,002
29,0	13	1,27	53	0,476	0,072	94,0	17	1,90	29	1,880	0,000
30,0	13	1,55	42	0,493	0,066						
31,0	18	1,32	51	0,509	0,045						
32,0	17	1,55	42	0,527	0,029						

Продолжение табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
33,0	16	1,59	41	0,545	0,033						
34,0	18	1,52	43	0,563	0,038						
35,0	15	1,64	39	0,582	0,026						
36,0	12	1,63	39	0,600	0,055						
37,0	9	1,58	41	0,617	0,037						
38,0	11	1,61	40	0,635	0,032						
39,0	10	1,54	43	0,652	0,021						
40,0	9	1,43	47	0,668	0,029						
41,0	15	1,32	51	0,683	0,021						
42,0	16	1,61	40	0,702	0,066						
43,0	15	1,66	38	0,721	0,004						
44,0	20	1,60	40	0,740	0,015						
45,0	18	1,65	38	0,759	0,004						
46,0	20	1,77	34	0,780	0,066						
47,0	18	1,80	33	0,800	0,004						
48,0	10	1,72	37	0,840	0,002						
49,5	11	1,69	37	0,850	0,000						

дочной толщи уникальна — при природной нагрузке лёссовые грунты и грунты палеопочв формально просадочны до глубины 44 м (коэффициент относительной просадочности равен 0,015), при нагрузке 0,3 МПа — до глубины 30,5 м. Расчетная суммарная просадка толщи при действии природной нагрузки составляет 225 см.

Значения величины коэффициента относительной просадочности лёссовых грунтов при природной нагрузке до глубины 41 м составляет 0,021—0,0112, палеопочвенных горизонтов 0,029—0,112. Наибольшие значения просадочности при этой нагрузке характерны для грунтов I, II и III циклитов. Достигнув наибольших значений (0,09—0,112) в нижней части II и верхней части III (мезенский педокомплекс) циклитов, ее величина на больших глубинах постепенно снижается и становится равной 0,021 на глубине 41 м, 0,015 на глубине 44 м и 0 на глубине 49,5 м (рис. 6, а; табл. 5).

Необходимо отметить, что Б.Ф. Галай провел независимое параллельное исследование просадочности лёссовых пород этого разреза до глубины 62,5 м (ниже породы разреза существенно уплотнены и водонасыщены). Судя по неопубликованным данным, любезно предоставленным Б.Ф. Галаем, им получены численные значения коэффициента относительной просадочности, очень близкие, в основном совпадающие с величинами, приведенными в табл. 5. Максимальные значения его (0,095—0,112) установлены им на тех же глубинах и в тех же элементах разреза. Однако есть и существенное отличие: формально в разрезе просадочные лёссовые породы простираются до глубины 42,0 м, на которой коэффициент относительной просадочности составлял 0,01. На глубине 44 м величина этого показателя составила, по его данным, 0,08. Ниже, до глубины 49,0 м, она изменялась в пределах 0,002—0,004; на глубине 49,5 м она (как и в табл. 5) равна 0. В интервале 50—62,5 м его величина составила 0,001—0,003.

Столь же актуальны данные Б.Ф. Галая (1984) о просадочности лёссовых пород, полученные им при изучении 100-метрового разреза, опорного в стратиграфическом отношении, в районе г. Буденновска. Как следует из табл. 5 и рис. 6, б, формально просадочными при действии собственного веса в этом разрезе являются лёссовые породы до глубины 55 м, практически до подошвы III циклита. Ниже, в разрезе IV и V циклитов, величина коэффициента относительной просадочности лёссовых пород ниже 0,01 и составляет 0,001—0,009.

Вторым районом, в пределах которого установлены мощные толщи просадочных лёссовых пород, является Приташкентский

район (Узбекистан). Здесь на ключевом участке "Чирчик" сотрудниками УзГИИНТИЗа под руководством Я.С. Садыкова изучен разрез с почти 39-метровой просадочной зоной.

На этом ключевом участке скважиной Ш-2/С-1<sup>1</sup> с абсолютной отметкой устья 687 м в пределах пятой надпойменной террасы, формирующей с более древними террасами возвышенно-адырную зону долины р. Чирчик, вскрыт разрез шести лёссовых циклитов мощностью 39,3 м, подстилаемых галечниками. Согласно местной стратиграфической шкале, эти отложения относятся к среднечетвертичным отложениям ташкентского комплекса. По схеме А.А. Лазаренко возраст лёссовых образований — среднеплейстоцен-голоценовый: голоцен-верхнеплейстоценовый — первый — четвертый комплексы, верхне-среднеплейстоценовый — пятый комплекс и среднеплейстоценовый — шестой комплекс.

Разрез этого района представлен супесями и пылеватыми суглинками; состав погребенных почв в основном легко- и среднесуглинистый. Влажность пород составляет 5—13%, пористость — 39—49%, причем наиболее пористые разности залегают в верхней 20-метровой части разреза.

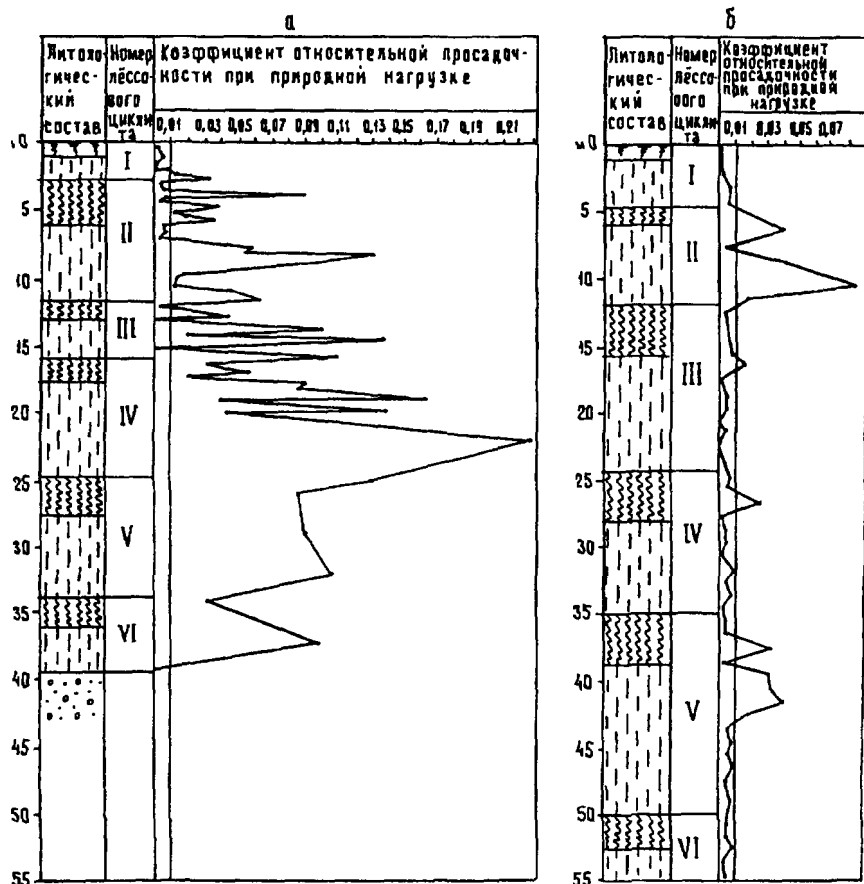
Просадочными при действии природной нагрузки оказались породы всех шести лёссовых циклитов (рис. 7, а; табл. 6). Нижняя граница просадочной толщи располагается на глубине, близкой к 39 м. На глубине 37 м при природной нагрузке 0,73 МПа коэффициент относительной просадочности составил 0,096. Максимальные же значения этого показателя отмечены в горизонтах лёссовых пород разных циклитов на глубинах 8,7 (0,130), 14,7 (0,140), 18,7 (0,160) и 22,0 м (0,227).

Просадочностью обладают и почти все горизонты погребенных почв. И хотя она ниже, чем у других составляющих лёссовых циклитов, значения коэффициента относительной просадочности пород погребенных почв при действии природной нагрузки достаточно велики: в первой погребенной почве — 0,003—0,040, во второй — 0,004—0,046, в третьей — 0,015—0,056, в четвертой — 0,085—0,129, в пятой — 0,091.

Очень интересные данные о большой мощности (45 м) просадочной толщи лёссовых пород получены в 1986 г. Н.Г. Мавляновым в том же районе на примере разреза "Келес". Здесь в

---

Верхние 20 м разреза вскрыты шурфом-дудкой диаметром 900 мм, более глубокие горизонты — скважиной диаметром до 160 мм с отбором монолитов "за один удар" через каждый метр.



**Рис. 7.** Распределение значений коэффициента относительной просадочности лёссовых пород по разрезу скважины Ш-2/С-1 ключевого участка "Чирчик" (а) и скважины С2КУ ключевого участка "Адырный" (б). Условные обозначения см. на рис. 6.

разрезу пород, представленном пролювиальными среднечетвертичными лёссовыми отложениями ташкентского комплекса мощностью 48,2 м, вскрыто четыре лёссовых циклита, верхний из которых венчается современной, а нижележащие — погребенными почвами. По составу в разрезе преобладают карбонатные лёссы супесчаные и легкосуглинистые, содержащие прослои более тяжелых суглинков; по всему разрезу отмечен рассеянный гипс. Естественная влажность пород до глубины 40 м составляет 5—8%, ниже она достаточно резко увеличивается и достигает 22% на глубине 46 м. Пористость лёссовых пород высокая

Таблица 6

Прочность и другие свойства лёссовых пород опорных разрезов  
 "Ирчик" (скважина Ш-2/С-1) и "Адырлы" (скважина С-2КУ) Центральновизятского региона

Скважина Ш-2/С-1						Скважина С-2КУ					
Глубина, м	Естественная влажность, %	Плотность скелета грунта, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Природная нагрузка, МПа	Относительная прочность при природной нагрузке	Глубина, м	Естественная влажность, %	Плотность скелета грунта, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Природная нагрузка, МПа	Относительная прочность при природной нагрузке
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,4	7	1,42	47		0,002	0,5	14	1,53	47	0,018	0,002
0,7	5	1,53	44		0,005	2,5	6	1,37	49	0,040	0,004
1,0	7	1,37	49	0,01	0,005	3,5	14	1,58	41	0,064	0,007
1,4	8	1,49	45		0,002	4,5	9	1,63	39	0,082	0,006
1,7	5	1,54	43		0,001	6,5	5	1,39	48	0,097	0,042
2,0	9	1,40	48	0,03	0,006	7,5	4	1,48	45	0,112	0,006
2,4	12	1,46	46		0,013	8,5	7	1,44	46	0,128	0,045
2,7	12	1,48	45		0,034	10,5	6	1,64	39	0,145	0,076
3,0	12	1,57	42	0,05	0,003	11,5	8	1,46	46	0,162	0,018
3,4	11	1,39	49		0,005	12,5	10	1,58	41	0,179	0,007
3,7	12	1,55	43		0,091	13,5	12	1,70	37	0,198	0,007
4,0	11	1,44	46	0,07	0,005	14,5	7	1,66	39	0,216	0,008
4,4	14	1,62	40		0,003	15,5	2	1,56	41	0,237	0,009
4,7	11	1,50	45		0,040	16,5	7	1,64	39	0,249	0,018

Приложение табл. 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5,0	12	1,52	44	0,09	0,012	17,5	7	1,70	37	0,267	0,001
5,4	11	1,51	45		0,020	18,5	5	1,64	39	0,284	0,005
5,7	13	1,56	42		0,035	19,5	6	1,66	38	0,302	0,004
6,0	10	1,49	44	0,11	0,006	20,5	8	1,78	34	0,321	0,001
6,4	7	1,46	46		0,006	21,5	12	1,69	37	0,340	0,004
7,0	11	1,39	49	0,13	0,003	22,5	13	1,64	39	0,358	0,001
7,7	13	1,44	47		0,059	23,5	11	1,62	40	0,376	0,006
8,0	10	1,39	49	0,15	0,055	24,5	10	1,58	41	0,393	0,008
8,7	11	1,37	49		0,130	25,5	11	1,77	35	0,413	0,006
9,0	9	1,42	48	0,17	0,090	26,5	13	1,66	38	0,432	0,029
9,7	12	1,49	46		0,016	27,5	12	1,77	35	0,452	0,002
10,0	10	1,44	46	0,19	0,013	28,5	13	1,62	40	0,470	0,004
10,7	7	1,51	43		0,011	29,5	9	1,59	41	0,487	0,005
11,0	12	1,49	44	0,21	0,043	30,5	9	1,78	34	0,506	0,003
11,7	7	1,47	45		0,063	31,5	11	1,58	41	0,524	0,009
12,0	13	1,65	39	0,23	0,004	32,5	9	1,69	37	0,542	0,006
12,7	9	1,50	44		0,046	33,5	8	1,61	40	0,559	0,008
13,0	11	1,52	43	0,25	0,002	34,5	9	1,64	39	0,571	0,005
13,7	11	1,51	44		0,100	35,5	10	1,65	39	0,585	0,004
14,0	11	1,48	45	0,27	0,018	36,5	13	1,64	39	0,614	0,004
14,7	11	1,50	44		0,139	37,5	14	1,51	44	0,631	0,032

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
15,0	11	1,53	43	0,29	0,002	38,5	16	1,63	40	0,650	0,003
15,7	13	1,52	43		0,0106	39,5	15	1,62	40	0,668	0,031
16,0	13	1,50	44	0,31	0,031	40,5	9	1,75	35	0,687	0,033
16,7	12	1,53	43		0,056	41,5	7	1,70	37	0,705	0,039
17,0	11	1,48	45	0,33	0,021	42,5	11	1,73	36	0,724	0,017
17,7	12	1,51	44		0,090	43,5	13	1,67	38	0,742	0,006
18,0	9	1,46	46	0,36	0,009	44,5	11	1,67	38	0,761	0,008
18,7	11	1,49	44		0,160	45,5	13	1,63	39	0,778	0,007
19,0	10	1,41	47	0,37	0,040	46,5	7	1,73	36	0,798	0,008
19,7	9	1,46	46		0,138	47,5	10	1,52	44	0,815	0,006
20,0	9	1,47	45	0,39	0,043	48,5	9	1,66	39	0,833	0,007
22,0	8	1,42	47	0,43	0,229	49,5	8	1,69	38	0,851	0,007
25,0	2	1,50	45	0,49	0,129	50,5	8	1,64	39	0,869	0,006
26,0	5	1,64	39	0,51	0,085	51,5	8	1,70	37	0,887	0,006
29,0	2	1,56	42	0,57	0,090	52,5	5	1,66	39	0,905	0,008
32,0	2	1,56	42	0,63	0,106	53,5	7	1,76	35	0,924	0,005
34,0	9	1,62	40	0,67	0,031	54,5	9	1,71	37	0,942	0,005
37,0	8	1,47	45	0,73	0,096	55,5	9	1,64	39	0,960	0,006
39,0	8	1,47	45		-						



(45—53%), причем значения ниже 50% характерны для нижней части разреза (ниже 35 м).

Просадочными в этом разрезе оказались породы всех четырех циклитов. Нижняя граница просадочной при действии природной нагрузки толщи составила 45 м (коэффициент относительной просадочности 0,01); на глубине 46 м величина последнего равна нулю.

Величина коэффициента относительной просадочности при природной нагрузке в этом разрезе закономерно скачкообразно возрастает до глубин 20—26 м, а затем с такой же логикой уменьшается. Просадочными являются не только лёссовые составляющие циклитов, но и горизонты погребенных почв (коэффициент относительной просадочности первой погребенной почвы, залегающей на глубине 7,1—8,0 м, составил 0,046, второй (9,3—10,7) — 0,047, третьей (35,0—36,4 м) — 0,024).

В верхнем циклите мощностью 7,0 м коэффициент относительной просадочности составлял 0,006—0,036, во втором (2,2 м) — 0,020—0,046, в третьем (25,8 м) — 0,020—0,085, в четвертом (видимая мощность 13 м) — 0,00—0,05. Наибольшие значения этого показателя (0,05—0,085) отмечены в интервале глубин 8—37 м.

Третий район с установленной аномально мощной толщей просадочных лёссовых пород расположен в восточной части г. Душанбе. Здесь в пределах Южно-Таджикской депрессии (Душанбинской впадины) расположен *ключевой участок "Адырный"*. Он включает адырную зону, тяготеющую к южным склонам Гиссарского хребта, и ограничен на западе арыком Тинтак, на востоке — ручьем Шуроксай, а на юге — низовьями р. Кафир-ниган.

Исследования лёссовых отложений этого района, проведенные А.Е. Додоновым, В.В. Кимом, Г.О. Ориповым, Е.Н. Сквалецким, геологами ТаджикГИИНТИЗа, показали, что максимальная мощность лёссовой толщи превышает 200 м. В ее составе обособлено два комплекса. Нижний из них, относимый к кайрубакской свите (эоплейстоцен), представлен непросадочными уплотненными лёссовыми породами с погребенными почвами. Верхний комплекс включает до 12—13 лёссовых циклитов плейстоценового и плейстоцен-голоценового возраста, каждый из которых (кроме первого, верхнего) включает горизонт лёссовых пород и венчающий их погребенный педокомплекс (или отдельный погребенной почвой).

На этом ключевом участке в 1987 г. скважиной С-2КУ (начальный диаметр 426 мм, конечный — 219 мм) в пределах

междуречного плато у абсолютной отметки 1020 м вскрыт разрез 12 лёссовых циклитов верхне-среднеплейстоценового возраста, венчаемый голоценовой почвой. По интерпретации инженеров-геологов ТаджикГИИНТИЗа, первый из этих циклитов имеет голоцен-верхнеплейстоценовый возраст, второй — пятый верхнеплейстоценовый, ниже лежащие шестой — одиннадцатый — среднеплейстоценовый; глубже залегают нижнеплейстоценовые лёссовые образования. Генезис лёссовых пород всех циклитов преимущественно пролювиальный или аллювиально-пролювиальный.

Разрез горизонтов лёссовых пород всех циклитов представлен пылеватыми супесями, лёссами, легкими и средними лёссовидными суглинками. Горизонты погребенных почв сложены в основном пылеватыми средними суглинками буровато-коричневых цветов.

Исследование просадочности этих пород, проведенное инженерами-геологами ТаджикГИИНТИЗа, показало, что просадочными при действии природной нагрузки оказались грунты верхних пяти циклитов. Нижняя граница просадочной толщи при действии природной нагрузки формально проводится на глубине 43 м (природная нагрузка 0,73 МПа, коэффициент относительной просадочности 0,012), хотя ниже ее, вплоть до глубины 55,5 м, лёссовые породы обладают коэффициентом относительной просадочности, отличным от нуля и составляющим в этой части разреза 0,005—0,008 (рис. 7, б; табл. 6). С учетом действия дополнительной нагрузки мощность просадочной толщи достигнет этой ошеломляющей величины.

Значения величины коэффициента относительной просадочности пород испытывают существенные колебания по разрезу — от 0,001—0,005 до 0,03—0,076 (табл. 6). Максимальные значения этого показателя отмечены в интервалах 6,5—10,5 (до 0,045—0,076), 16,5 (0,018), 26,5 (0,029), 37,5—41,5 м (0,032—0,039). При совместном действии природной и дополнительной (0,3 МПа) нагрузок коэффициент относительной просадочности в верхних 25 м разреза составил 0,012—0,134.

Необходимо подчеркнуть, что на этом же ключевом участке скважиной С-4\* глубиной 130 м, пройденной ранее ТаджикГИИНТИЗом в пределах более низкого уровня рельефа (абсолютная отметка устья скважины 830,0 м), также вскрыта мощная толща верхнеплейстоценовых просадочных грунтов. Величина коэффициента относительной просадочности при природной нагрузке, равная 0,01, установлена на глубине 36 м; ниже до глубины 40 м она колеблется в пределах 0,003—0,007. Максималь-

ные же ее значения (0,011—0,046) приурочены к верхней 20-метровой части разреза.

Полученные данные позволяют сделать три важных вывода:

- 1) максимальная мощность просадочных толщ лёссовых пород достигает существенно больших значений (до 50—55 м), чем считалось ранее. Установление этого факта — своеобразное открытие в инженерной геологии лёссовых пород;
- 2) просадочные свойства могут проявлять лёссовые породы не только двух-трех верхних циклитов, что является чуть ли не общепринятым мнением (Кригер, 1969; Сквалецкий, 1987), но и более глубоких. В разрезах ключевых участков “Отказное” и “Адырный” просадочными оказались грунты пяти верхних циклитов лёссовых пород, а в разрезе участка “Чирчик” — даже шести циклитов;
- 3) в разрезах описанных ключевых участков просадочные свойства проявляются не только в горизонтах, сложенных лёссовыми породами, но и в горизонтах погребенных почв. Это во многом противоречит широко распространенному среди инженеров-геологов мнению (Е.М. Сергеев, А.В. Минервин и др.), что грунты горизонтов погребенных почв непросадочны.

## 1.6.

### **Изменение величины просадочности по разрезу толщи лёссовых пород**

Распределение величины относительной просадочности по разрезу имеет существенно неодинаковый характер в толщах лёссовых пород различного строения. В северных районах области распространения лёссовых пород, где в основном развиты однородные по строению, как правило, относительно маломощные толщи, включающие только один седиментационный комплекс (циклит), в большинстве случаев отмечается закономерное уменьшение просадочности по разрезу как при природных, так и при дополнительных нагрузках (рис. 8, а). В южных районах такое распределение величин коэффициента относительной просадочности отмечается в толщах лёссовых пород, развитых на низких надпойменных террасах. Однако наряду с этим здесь встречаются и иные типы распределения просадочности под природной нагрузкой: а) сначала вниз по разрезу идет некоторое увеличение значений коэффициента относительной просадочности (обычно на глубинах 5—6 м, редко более), а затем в разной степени закономерное уменьшение его (рис. 8, б); б) скачкообразное незакономерное изменение этого показателя по зна-

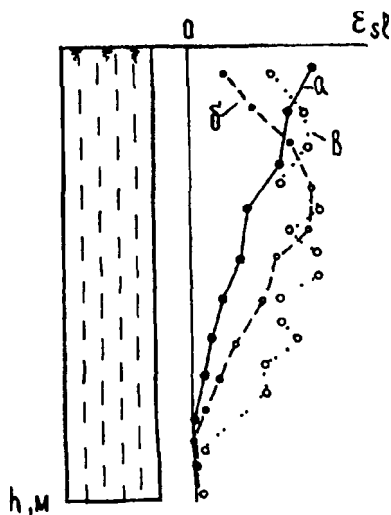


Рис. 8. Характер изменения величины просадочности по разрезу в мало-мощных однородных по строению толщах лессовых пород (пояснения в тексте, по В.Т. Трофимову, 1985)

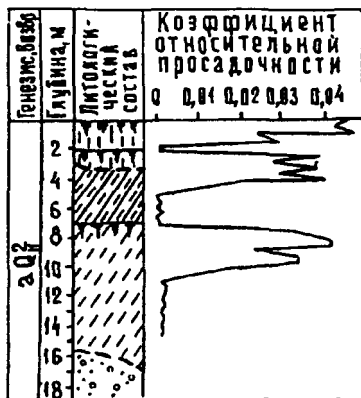


Рис. 9. Характер изменения коэффициента относительной просадочности при нагрузке 0,3 МПа по разрезу в циклично построенной толще лессовых пород 40–45-метровой террасы р. Енисей у Красноярска (по А.В. Минервину, Е.М. Сергееву, 1964)

1 — супесь лёссовидная карбонатная, 2 — суглинок легкий лёссовидный карбонатный, 3 — суглинок средний карбонатный с тонкими линзами и прослойками песков, 4 — галечник, переслаивающийся с песками, 5 — почвы современная и погребенные чериоземного облика

чительной части разреза и резкое его уменьшение лишь в нижней (рис. 8, в).

В мощных, циклично построенных толщах, широко развитых в южных районах СССР, картина распределения просадочности по разрезу более сложная и в целом имеет “циклический” характер<sup>1</sup>.

Установление широкого распространения лёссовых пород с циклическим распределением величин просадочности по разрезу в толщах сложного строения, содержащих погребенные почвы, имело в целом важное значение для развития представления и генезисе этого свойства лёссовых пород. Это явление было

<sup>1</sup> Циклически — от слова цикличность, обозначающее, по Ю.Н. Кародину, повторяемость циклитов, в том числе лёссовых (циклессов), в разрезе. Слово циклический здесь умышленно взято в кавычки. Этим мы стремились отразить условность его применения в данном смысле, но ставшем в определенной степени привычным в инженерно-геологической литературе. В дальнейшем кавычки опускаются.

вначале описано Х.А. Аскарковым (1955) для Средней Азии и И.П. Ивановым (1956), Л.С. Мелик-Пашаевым (1962) для Украины, но не получило генетической трактовки. В 1962 г. А.В. Минервин (Минервин, Сергеев, 1964) установил подобный феномен для разреза 40—45-метровой надпойменной террасы Енисея в районе Красноярска, сложенной в верхней части разреза (0—16 м) лёссовыми породами аллювиального генезиса, содержащими два горизонта погребенных почв и венчающихся современной почвой черноземного типа (рис. 9). В этом разрезе наиболее просадочные разности (с коэффициентом относительной просадочности до 0,04—0,047 при нагрузке 0,3 МПа, превышающей природную по всей толще) в пределах каждого седиментационного комплекса, венчающегося почвами (нижние два — погребенными, верхний — современными), находятся непосредственно под ними. Вниз по разрезу каждого такого комплекса просадочность скачкообразно закономерно уменьшается, и над погребенной почвой залегают непросадочные лёссовые породы. Наличие такой картины позволило А.В. Минервину и Е.М. Сергееву (1964) предположить, что просадочность является результатом разуплотнения лёссовых пород под влиянием выветривания.

Дальнейшие исследования показали, что сложные по строению лёссовые толщи с погребенными почвами, которым свойственно циклическое изменение просадочности по разрезу, развиты во многих районах Евразии. И одним из наиболее распространенных их типов явились разрезы, в которых просадочность в пределах каждого циклита наибольшая непосредственно под современной или погребенной почвой (первый подтип разреза) или несколько ниже их (до 2—4 м — второй подтип разрезов), и вниз она закономерно убывает. Такие толщи лёссовых пород установлены в Болгарии, Молдавии, в Предкавказье, Нижнем Прикамье, Средней Азии, юге Западной Сибири<sup>1</sup>.

Одновременно было установлено наличие разрезов, в которых наибольшая величина просадочности характерна для пород второго комплекса, а также разрезы, в которых величины коэффициента относительной просадочности и их распределение по толще I и II циклитов лёссовых пород близки между собой. Они отмечены в Молдавии (Приднестровье), Нижнем Прикамье, Средней Азии, в Сибири. Разрезы последнего типа

---

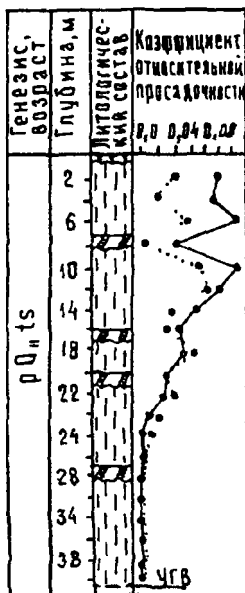
<sup>1</sup> К сожалению, далеко не во всех работах приводятся данные об изменении коэффициента относительной просадочности по глубине и при природном давлении, и при дополнительной нагрузке. Это затрудняет определение генезиса просадочности описанных толщ лёссовых пород.

а

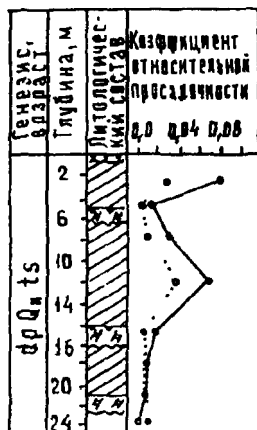


Рис. 10 Характер изменения коэффициента относительной просадочности по разрезу в циклически построенных толщах лессовых пород ташкент-

б



в



ского комплекса Чирчик-Ахангаранской впадины (по ХЛ Рахматуллаеву, 1977)

1 — лёсс, 2 — сутлинок лёссовидный, 3 — современная и четко выраженные погребенные почвы, 4 — слабо выраженные (зачаточные) погребенные почвы, 5, 6 — кривые изменения коэффициента относительной просадочности при природной нагрузке (5) и нагрузке 0,3 МПа (6)

приведены на рис. 10. Весьма симптоматично, что в разрезах пролювиальных и делювиально-пролювиальных отложений под горизонтами современной и погребенных почв или несколько ниже их залегают, как правило, более просадочные разности, причем это характерно для испытаний как под природной нагрузкой, так и при давлении 0,3 МПа. Разрезы с описанными особенностями изменения просадочности отнесены к первому типу (Трофимов, 1985); в его рамках выделены три подтипа (рис. 11).

Наряду с описанными установлены и иные типы распределения просадочности по разрезу циклитно построенных толщ. Для одного из них (II тип, см. рис. 11) в верхнем седиментационном комплексе — циклите характерно не уменьшение величины коэффициента относительной просадочности вниз по разрезу, а, наоборот, ее увеличение и при бытовой и при дополнительных нагрузках (рис. 12, а, б). В подстилающих этот комплекс отложений погребенных почвах величина просадочности резко

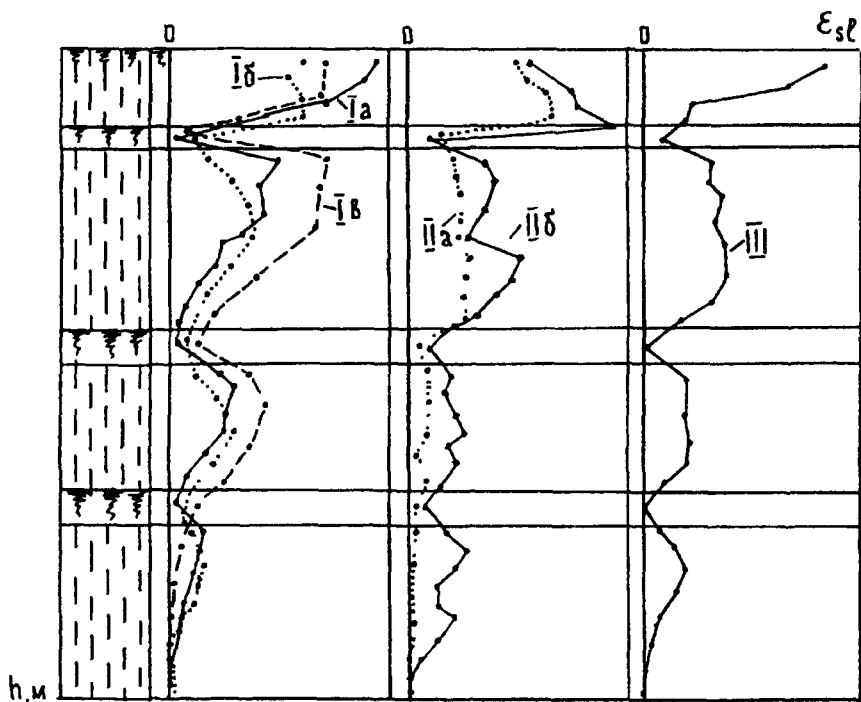


Рис 11. Характер изменения величины просадочности по разрезу в мощных циклично построенных толщах лёссовых пород при нагрузке 0,3 МПа (пояснения в тексте)

уменьшается. В пределах второго циклита величина этого коэффициента остается практически постоянной или даже несколько увеличивается вниз по разрезу (первый подтип разрезов данного типа см. на рис. 12, а) или испытывает достаточно рельефные изменения и закономерно уменьшается лишь в нижней части циклита (второй подтип разрезов — см. рис. 12, б). В породах более глубоко залегающих седиментационных комплексов максимальные значения просадочности даже при одной и той же нагрузке (0,3 МПа) также отмечены не под горизонтами погребенных почв.

Третий тип распределения просадочности по разрезу циклически построенных толщ лёссовых пород как бы включает элементы первого и второго типа (рис. 11, 12). Первый из них — закономерное уменьшение коэффициента относительной просадочности вниз по разрезу при дополнительных нагрузках — характерен для пород верхнего седиментационного комплекса — циклита. В лёссовых породах нижележащего циклита наблюдается

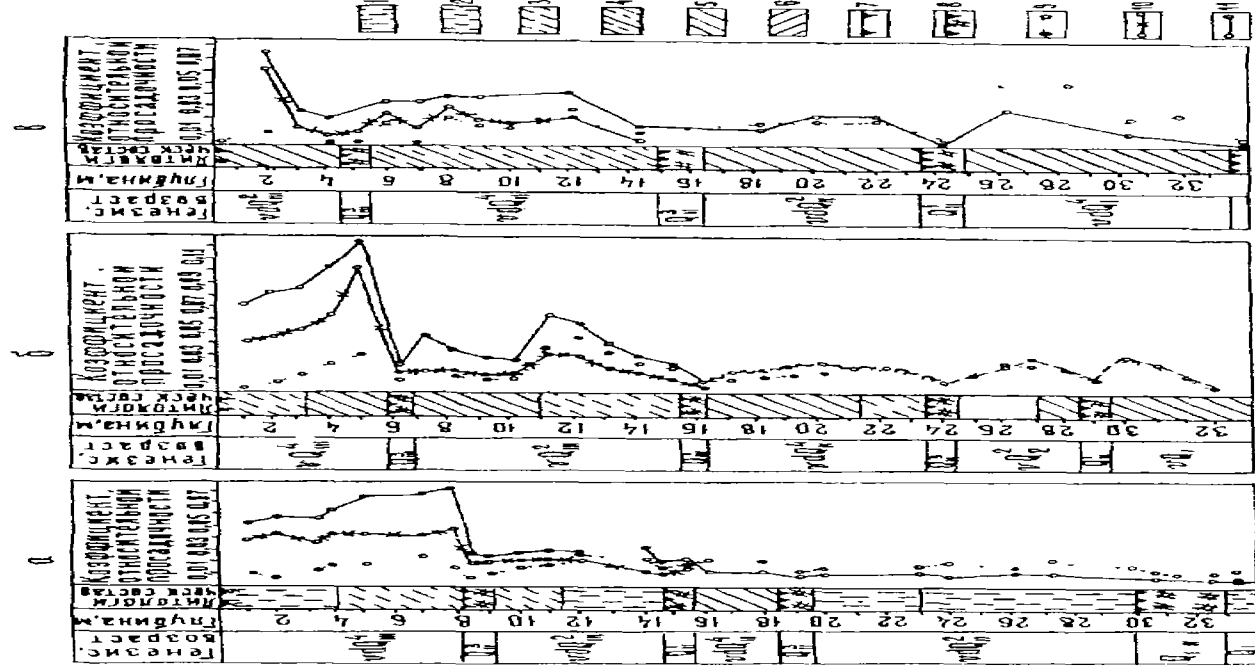


Рис 12 Характер изменения коэффициента относительной сжимаемости по разрезу в циклически построенных толщах лесостепных пород Терско-Кавказского (а), в районе Буен-Вадина в районе Волгодонска (б) и в южном Приднепровье в районе Кипи-нева (в) (материал предоставлен Я.Е. Шевченко)

1 — супесь легкая, 2 — супесь тяжелая, 3 — супесь легкая, 4 — супесь легкая и средняя, 5 — супесь легкая, 6 — супесь средняя, 7 — супесь тяжелая, 8 — супесь тяжелая, 9 — супесь тяжелая, 10 — супесь тяжелая, 11 — супесь тяжелая



иная картина: значения коэффициента относительной просадочности в пределах большей части его разреза не испытывают тенденции к закономерному снижению, она проявляется лишь в самой нижней части его (рис. 12, в). Близкая картина при принятом шаге опробования наблюдается и по разрезу третьего седиментационного комплекса.

Таким образом, уже к 1985 г. был выделен один тип и три подтипа изменения величины просадочности по разрезу мало-мощных простых по строению толщ лёссовых пород и три ти-

Таблица 7

Схематическая классификация изменчивости  
просадочности с глубиной  
(по Е.Н. Скваецкому, 1987)

Тип режима	Подтип режима	Изменение просадочности	Формула подтипа
I — закономерный скачкообразный (нестационарный)	Ia — убывающий	с глубиной снижается	$x_1 > x_2 > x_3 > x_4$
	Iб — выпуклый	с глубиной возрастает, достигает максимума, затем снижается	$x_1 < x_2 < x_3 < x_4 > x_5 > x_6$
	Iв — ритмичный	возрастает и снижается с глубиной в 2 раза и более	$x_1 < x_2 < x_3 > x_4 > x_5 < x_6 < x_7$
II — закономерный скачкообразный (стационарный)	II — равномерный	с глубиной практически не меняется	$x_1 \approx x_2 \approx x_3 \approx x_4$
III — комплексный	IIIa — равномерно убывающий	в верхних слоях равномерная, в нижних уменьшается	$x_1 \approx x_2 \approx x_3 \approx x_4 > x_5 > x_6 > x_7$
	IIIб — равномерно выпуклый	в верхних слоях возрастает, глубже — равномерная, в нижних — уменьшается	$x_1 < x_2 < x_3 > x_4 \approx x_5 > x_6 > x_7$
	IIIв — равномерно ритмичный	в верхних слоях высокая, в нижних низкая или наоборот (чередование 2 раза и более)	$x_1 \approx x_2 \approx x_3 \approx x_4 \approx x_5 > x_6 > x_7$

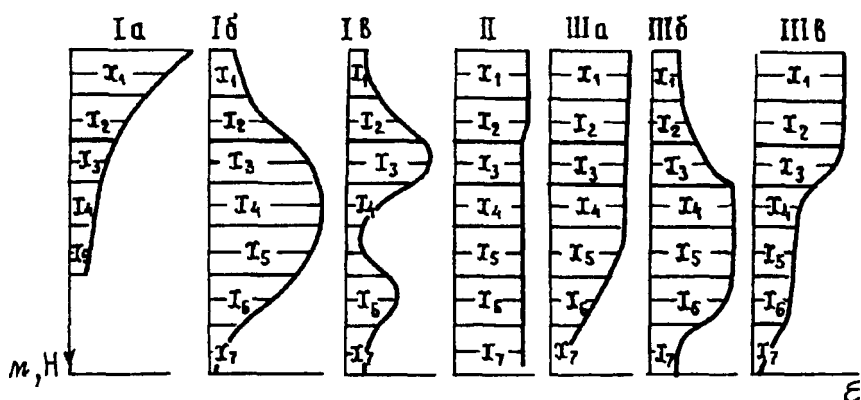


Рис. 13. Изменение величины просадочности по разрезу толщ лёссовых пород Средней Азии (по Е.Н. Сквалецкому, 1987)

па и пять подтипов в мощных, циклично построенных толщах этих пород. Каждый из этих морфологических типов получил генетическую трактовку (Трофимов, 1985).

Классификация типов распределения просадочности по разрезу толщ лёссовых пород также разрабатывалась Е.Н. Сквалецким (1987, 1987а). Она составлена им для лёссовых толщ Средней Азии и в концентрированном виде представлена в табл. 7 и на рис. 13.

## 1.7.

### Классификация толщ лёссовых пород по их строению и особенностям изменения просадочности

Для подразделения лёссовых толщ существенными являются не только их генезис и строение, но и особенности состава, состояние и свойства горных пород, которыми они сложены. В связи с этим и генетические, и палеогеографические, и стратиграфические, и морфологические признаки могут быть использованы для выделения толщ лёссовых пород и их иерархического подразделения. Однако использование морфологических признаков с инженерно-геологических позиций является обязательным.

В монографии "Лёссовые породы СССР" (1986) приводится классификация лёссовых массивов, в которой прежде всего учитываются: 1) характер контакта между лёссовыми и подстилающими их породами; 2) наличие цикличности в строении массива.

вов, обуславливающей периодическое изменение состава, структуры и свойств пород; 3) разнообразие состава пород и их комбинаций в массивах различных типов. На основе такого подхода в классификации выделены следующие виды лёссовых массивов: 1) однородные массивы: а) имеющие резко выраженную границу с подстилающей толщей, б) постепенно переходящие в подстилающие породы; 2) массивы, содержащие погребенные почвы: а) с резко выраженной границей с подстилающей толщей; б) с постепенным переходом в подстилающие породы; 3) массивы сложного строения: а) содержащие прослои песков, глин, гравийно-галечниковые и т.д. (иногда погребенные почвы), б) содержащие захороненные древние элементы мезорельефа (овраги, степные блюдца, промоины и т.д.); 4) лёссово-ледовые массивы (с прослоями льда, широким развитием криотурбации и т.д.); 5) погребенные массивы, перекрытые нелёссовыми породами. В итоге выделены три основные инженерно-геологические модели массивов: А — включающая однородные лёссовые массивы, Б — содержащая прослои погребенных почв, В — содержащая наряду с лёссовыми породами горизонты песков, глин и других нелёссовых пород.

Однако эта классификация имеет чисто описательный характер, не учитывает такой важной характеристики лёссовых толщ, как цикличность в распределении показателей свойств грунтов, в том числе и просадочности. Цикличность является той особенностью, которая позволяет раскрыть причины возникновения в лёссовых толщах слоевых ассоциаций разного порядка. Отдельные лёссовые циклиты (циклессы) — это не случайное чередование литологических разностей, а совершенно закономерно построенные комплексы, отражающие взаимодействие участвующих при их образовании различных природных факторов (Шаевич, 1987). Отсюда исходит теоретическая обоснованность и практическая необходимость разделения толщ по особенностям их строения на три класса: циклитчески, ациклитчески и смешанно построенные (Трофимов и др., 1987, 1989; Шаевич, Трофимов, 1987). Циклитно построенные, как правило, мощные толщи лёссовых пород установлены во всех районах Северной Евразии. Ациклитный тип строения наиболее широко развит в северных районах области распространения лёссовых пород, в южной ее части он в основном приурочен к молодым геоморфологическим элементам рельефа. Смешанно построенные толщи иногда достигают мощности до 100 м; характеризуются тем, что часть хорошо выраженных в разрезах лёссовых циклитов венчает или, наоборот, подстилает монотонные толщи.

Относительная просадочность по разрезу также изменяется циклически. Однако направленность этих изменений имеет сложный характер. При общей тенденции уменьшения относительной просадочности с глубиной установлено несколько основных типов, причем наибольшее число типов изменения просадочности по разрезу отмечается именно в циклически построенных толщах.

Эти позиции учтены в классификации толщ лёссовых пород, предложенной Я.Е. Шаевичем и В.Т. Трофимовым (1987); она приведена в табл. 8. В этой классификации, построенной по типу "древа", в качестве таксономического принят следующий ряд единиц: класс — подкласс — группа — подгруппа — тип — подтип — вид — разновидность.

Класс выделяется по особенностям строения лёссовой толщи (обозначается прописными буквами): ЦП — циклически построенная толща; АЦП — ациклически построенная толща; СП — смешанно построенная толща. Подкласс выделяется по особенностям строения элементарных породно-слоевых ассоциаций в толщах ЦП, АЦП и СП (обозначается строчными буквами алфавита): А — циклессы (циклиты лёссовые); Б — многослои; В — однослои.

Группа выделяется по характеру направленности относительной просадочности в толщах ЦП, АЦП и СП и обозначается определенными символами (см. табл. 8). В их качестве выделяются толщи лёссовых пород, в которых относительная просадочность уменьшается сверху вниз; относительная просадочность сначала увеличивается, а затем уменьшается; относительная просадочность сначала уменьшается, затем увеличивается и вновь уменьшается. Подгруппа выделяется по характеру направленности относительной просадочности в границах отдельных циклессов, многослоев, однослоев (обозначается меньшими по размерам символами групп). В их пределах относительная просадочность уменьшается сверху вниз, или увеличивается сверху вниз, или сначала увеличивается, а затем уменьшается.

Тип толщи лёссовых пород выделяется по величине суммарной просадки толщи грунтов от их собственного веса, а подтип — по величине относительной просадочности грунтов при нагрузках от собственного веса (см. табл. 8). Подтипы а, б относятся преимущественно ко II типу толщ по просадочности, подтипы в, г — I типу.

Вид толщ обособляется по мощности (толщине) просадочной толщи грунтов. Для каждого интервала глубины учитываются значения относительной просадочности при суммарном давлении от внешней нагрузки и собственного веса грунтов выше сжи-



1	2	3	4	5	6	7	8
II. Аналистично-построенная модель (АИПТ)	В — многослойные лесовые группы, обладающие свойствами садочными слоями, залегают в верхней части разреза	проницаемость в толще уменьшается сверху вниз	проницаемость в толще возрастает к середине, а затем уменьшается	I II	I — слабосадочные $\varepsilon_{\text{ср}} = 1-3\%$ непродонные $\varepsilon_{\text{ср}} < 1\%$	$H_{\text{ср}} \text{ до } 3 \text{ м}$ $H_{\text{ср}2} = 3-5 \text{ м}$ $H_{\text{ср}3} = 5-10 \text{ м}$	$S_{\text{ср}} < 25 \text{ см}$
			затем уменьшается				
	В' — многослойные лесовые группы, обладающие свойствами садочными слоями, залегают под непродонными крупными ломочными, песчаными и глинистыми породами		проницаемость в толще возрастает к середине, а затем уменьшается				
	В — однослойные лесовые группы, обладающие свойствами садочными слоями, залегают с непродонными и пылевато-глинистыми грунтами						

1	2	3	4	5	6	7	8
III. Смешанно построенная толща (СП)	Б — микстосом и односом (В), представленные песчано-глинистыми грунтами, переходяют (на глубине 3—5 м) в известняки	толщина просадочности в толще уменьшается сверху вниз, а затем увеличивается	в границах отдельных известняков и микстосом просадочность чаще всего уменьшается к толще известняков	I II	среднепродолжительные $\varepsilon_{3d} = 3-5\%$ слабопродолжительные $\varepsilon_{3d} = 1-3\%$ микропродолжительные $\varepsilon_{3d} < 1\%$	для микстосом $H_{ср}$ до 3 м для известняков $H_{ср}$ до 3 м $H_{ср} = 3-5$ м	$S_{н} < 25$ см

Примечание  $S_{н}$  — суммарная просадка,  $H_{ср}$  — мощность просадочной толщи,  $\varepsilon_{3d}$  — относительная просадочность

маемой зоны. Выделяется шесть видов толщ лёссовых пород (табл. 8). Первый и второй из них слагают преимущественно толщи I типа, виды четвертый-шестой — преимущественно толщи II типа.

Разновидность толщи выделяется по величине суммарной просадки толщи. Их обособлено три категории (табл. 8). Подчеркнем, что для таксонов “вид” и “разновидность” принимается такое исходное условие: глубина заложения условного фундамента от поверхности природного рельефа 2 м, ширина подошвы фундамента 2 м, среднее давление под подошвой фундаментов 0,3 МПа.

Предложенная классификация толщ лёссовых пород по особенностям строения и характеру просадочности является комплексной, так как учитывает качественные и количественные характеристики строения лёссовых толщ, а также направленность изменения просадочности в пределах как отдельных слоев и их ассоциаций, так и толщи в целом, величины просадочности при разных давлениях, величины просадки толщи грунтов от их собственного веса, величину суммарной просадки толщи.

### 1.8.

#### **Об инженерно-геологическом содержании термина “лёсс” и его производных**

В современной инженерно-геологической литературе широко используется термин “лёсс” и семь его производных: лёссовая порода, лёссовидная порода, лёссоподобная порода, лёсс деградированный, лёсс видоизмененный, лёссоид, лёссолит. Кроме того, используется термин “нелёссовая порода”. Однозначного, даже с инженерно-геологических позиций, понимания содержания подавляющей части этих терминов нет. В последние годы в инженерно-геологической литературе прослеживается достаточно четкая тенденция — определять содержание термина “лёсс” и его производных с учетом не только состава и других литологических особенностей этих пород, но и просадочности как специфического их свойства. И эта тенденция представляется нам правильной.

**Анализ существующих подходов к определению термина “лёсс” и его производных.** По современным представлениям лёсс как порода относится к лёссовым (пылеватым) грунтам подгруппы связных грунтов. В ГОСТ 25100—82 (1982) лёсс как особая категория грунтов не выделялся; в нем обособляются только лёссовые грунты.



Лёссовая порода. Этот термин по своему содержанию является наиболее широким. Он используется давно, и еще Н.Я. Денисов, С.С. Морозов и многие другие исследователи объединили под этим термином совокупность лёссов и лёссовидных пород, а В.В. Попов — и видоизмененные лёссы и лёссовидные породы.

Достаточно четко содержание этого термина было определено по предложению А.К. Ларионова на совещании по лёссовым породам УССР в 1955 г. На нем под лёссовыми породами договорились понимать “континентальные породы разного происхождения, содержащие более 50% фракции 0,05—0,005 мм (при *микроагрегатном* (курсив мой. — В.Т.) способе подготовки образца) и обладающие высокой пористостью и наличием макропор” (Ларионов и др., 1959, с. 9—10).

Это определение, несомненно, является более однозначным по сравнению с предложением С.С. Морозова. В частности, он писал: “Общим признаком для лёссовых пород по гранулометрическому составу является хорошая отсортированность их, почти полное отсутствие частиц крупнее 0,25 мм, значительное содержание тонкопесчаных (0,10—0,05 мм), а также крупно- и мелкопылеватых (0,05—0,01 и 0,01—0,005 мм) частиц (от 30 до 90% и более). Содержание в лёссовых породах частиц менее 0,01 и менее 0,001 мм может варьировать в широких пределах” (Морозов, 1956, с. 186).

В опубликованной С.С. Морозовым (1964) классификации лёссовых пород по гранулометрическому составу выделены лёссы, лёссовидные пески, лёссовидные супеси, лёссовидные суглинки и лёссовидные глины. В целом лёссовые породы характеризуются следующим содержанием частиц различного размера: 0,1—0,01 мм — 10—96%; меньше 0,01 мм — 3—80 и более; 0,01—0,005 мм — 0—46 и меньше 0,001 мм — 0—60%.

Позже, уточняя ранее выдвинутые положения, А.К. Ларионов (1984) в качестве классификационных критериев для отнесения пород к лёссовым выдвинул два следующих: 1) высокую пылеватость, определяемую содержанием фракций 0,05—0,005 мм более 45% (при *микроагрегатной* подготовке) и 2) своеобразную лёссовую структуру, характеризующуюся прежде всего развитием трубчатых макропор. Эта же позиция — высокое содержание (более 50%) частиц размером 0,05—0,005 мм по результатам микроагрегатного анализа — принята и в монографии “Лёссовые породы...” (1986).

Однако в последней работе мы видим и иной подход к обособлению рассматриваемого понятия: “Лёссовые породы (си-

ноним термина “пылеватые породы”) в ряду осадочных не-сцементированных пород занимают место между песчаными и глинистыми и подобно им имеют полигенетическое происхождение. Главная инженерно-геологическая особенность лёссовых пород — их *просадочность* (курсив мой. — В.Т.)” (там же, с. 4).

Еще более существенные отличия появляются в ГОСТе 25100—82 (1982), в котором к лёссовому грунту отнесен “пылевато-глинистый грунт, содержащий по *гранулометрическому* составу более 50% пылеватых (размером 0,05—0,006 мм) частиц, легко- и среднерастворимые соли и карбонаты кальция; однородный, преимущественно макропористый; в маловлажном состоянии способен держать вертикальный откос; *при замачивании маловлажный лёссовый грунт дает просадку* (курсив мой. — В.Т.), легко размокает и размывается, а при полном водонасыщении может переходить в плавунное состояние” (с. 7).

Такая же точка зрения высказана и Н.В. Воляником (1989), который отмечал, что лёссовидный грунт проявляет при природной влажности склонность к просадкам.

Аналогичные критерии (особенности гранулометрического состава и проявление просадочности), отличные от вышеназванных только количественно, использованы В.А. Поляниным и К.Н. Колобовым (1984) при разработке малоизвестной оригинальной классификации лёссовых пород (рис. 14, табл. 9). По их

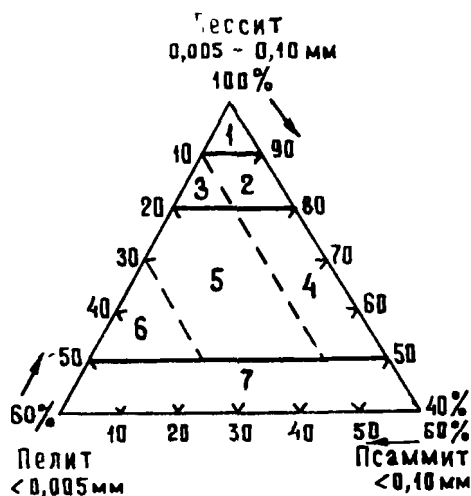


Рис. 14. Классификация лёссовых пород, предложенная В.А. Поляниным и К.Н. Колобовым (1984)

мнению, к лёссовым относится семейство пород, содержащих более 50% лёсситовой (0,10—0,005 мм) фракции, в том числе более 25% лёссовой (0,05—0,01 мм) и обладающих просадочностью.

Б.Ф. Галай (1984), подобно С.С. Морозову, обособляет лёссовые породы как семейство лёсс — лёссовидный суглинок — лёссовидная глина только по особенностям гранулометрического состава (подготовка к анализу — растирание с пиррофосфатом

Таблица 9

Классификация лёссовых пород,  
предложенная В.А. Полянным и К.Н. Колобовым  
(1984)

Разновидности лёссовых пород	Номер на рис. 14	Содержание фракции, %		Пористость, %	Просадочность
		лёссит (0,005—0,10 мм)	в том числе лёсс (0,01—0,05 мм)		
Лёсс	1	> 90	> 45	50—60	сильнопросадочный
Лёссоид					среднепросадочный
супесчаный	2	> 80	> 40	45—55	
суглинистый	3			50—60	
Лёссолит					средне- и слабопросадочный
супесчаный	4			40—50	
суглинистый	5	> 50	> 25	45—55	
глинистый	6			50—60	
Нелёссовые породы	7	> 50	< 25	—	непросадочные

натрия). В целом для этого семейства, исключая лёссовидную глину, характерно содержание частиц размером 0,1—0,01 мм от 28 до 85%, частиц меньше 0,005 мм содержится от 10 до 60%, меньше 0,002 мм — от 8 до 48%. Для лёссовидной глины их содержание составляет менее 28, более 60 и 48% соответственно.

Достаточно специфическое определение лёссовых пород дано Ю.М. Абелевым и М.Ю. Абелевым (1968). Наиболее характерными их признаками они считали макропористость структуры, пылеватость и “агрегатность”.

Таким образом, следует констатировать три положения в отношении рассмотренного понятия: 1) критерии выделения лёссовых пород существенно различны в предложениях разных исследователей; 2) даже при использовании для выделения лёссовых пород одного из чисто литологических признаков — содержания пылеватых (0,05—0,005 мм) частиц — одни авторы опираются на результаты микроагрегатного, другие — гранулометрического анализа; 3) в последнее время при выделении лёссовых пород в качестве важнейшего их признака стала рассматриваться просадочность. Однако подход к использованию этого признака неодинаков: одни авторы считают просадочность свойственной всем лёссовым породам, другие — только при малой влажности.

Лёсс. Содержание понятия “лёсс”, предложенное различными авторами, критически рассмотрено, как уже упоминалось выше, Н.И. Кригером (1965—1986). Оно также обсуждалось Г.А. Мавляновым (1958), А.К. Ларионовым (1984) и другими исследователями. Не останавливаясь на описании всех разновидностей определения “лёсс”, проанализируем лишь следующие три: 1) генетическое, 2) литологическое и 3) инженерно-геологическое. Именно они наиболее часто используются в инженерно-геологических работах.

*Генетическое определение.* Такое определение термина “лёсс” дается обычно сторонниками эоловой гипотезы лёссообразования. Их кредо выражается словами “лёсс — эоловая порода”. Существует и другая крайняя точка зрения. Б.В. Пясковский в 1951 г. предложил называть лёссом те образования, которые в той или иной степени прошли процесс облессования. Аналогичную позицию, по существу, принимают А.В. Минервин и Е.М. Сергеев. В частности, Е.М. Сергеев (1976) указывает, что лёссы являются породами элювиального генезиса, элювием лёссовидных отложений.

Определение лёсса как породы определенного генезиса неоднократно подвергалось обоснованной критике (см., например, у Н.И. Кригера (1965, 1986)). Здесь лишь добавим, что генетическое определение термина “лёсс” из-за дискуссионности и сложности определения во многих случаях генезиса отложений для инженерно-геологических целей неприемлемо. Да и в геологии четвертичных отложений уже отказываются от одногенетического понимания лёсса: “В связи со спорностью генезиса лёссов они не могут считаться представителями какого-либо одного генетического типа отложений и поэтому нередко выделяются на геологических разрезах и картах четвертичных отложений по *литологическим признакам* (курсив мой. — В.Т.), без указания генезиса” (Шанцер, 1982, с. 88).

Кроме того, генетический подход к определению содержания понятия “лёсс” в рассмотренном плане неприемлем еще по двум позициям. Он не отражает ни особенностей состава породы, ни ее свойств, в частности главного из них с инженерно-геологических позиций — просадочности.

*Литологическое определение.* Предложения этой группы наиболее многочисленные. Всю их совокупность целесообразно разбить на три части. В первую из них объединяются предложения о выделении лёсса только по гранулометрическому составу, во вторую — по составу и структурно-текстурным особенностям породы, а третью — по перечисленным факторам и условиям залегания пород.

Первый подход — использование гранулометрического состава как признака выделения лёссов в наиболее контрастном (“чистом”) виде — использовал С.С. Морозов (1956, 1964). В классификации лёссовых пород им выделен “обобщенный” лёсс — порода, содержащая 50—84% частиц размером 0,1—0,01 мм и 16—48% частиц диаметром менее 0,01 мм. Кроме того, выделяются лёсс легкосуглинистый и лёсс среднесуглинистый на основе учета содержания частиц диаметром менее 0,01 мм. В зависимости от количественного содержания тонкопесчаных и крупнопылеватых частиц их название уточняется (Морозов, 1964).

Гранулометрический состав (подготовка — растирание с пирофосфатом натрия) использован и Б.Ф. Галаем (1984). Им к лёссам отнесены породы, содержащие 60—85% частиц диаметром 0,1—0,01 мм, 10—30% — менее 0,005 мм и 8—24% — менее 0,002 мм.

Второй подход, основанный на использовании состава и структурно-текстурных особенностей, пород для выделения лёсса, применяется достаточно широко. Многие исследователи (Н.Я. Денисов, М.П. Лысенко, А.К. Ларионов, Р. Рассел, Н.И. Кригер, Е.П. Емельянова и др.) под лёссом понимали пылеватую породу светло-палевого цвета, характеризующуюся отсутствием или слабовыраженной слоистостью, высокой пористостью и наличием макропор.

Так, по А.К. Ларионову (1984), лёсс — это лёссовая порода, которая в дополнение к общим для нее признакам (см. ранее) характеризуется отсутствием слоистости, зернисто-пленчатой или пылевато-пленчатой структурой и преобладанием гидрослюд, смешанослойных минералов, кварца, карбонатов и каолинита в тонкой фракции. В.В. Попов в работах 50-х годов относил к лёссам недоуплотненные породы, прошедшие полную стадию пустынного диагенеза в процессе накопления мелкозема и характеризующиеся высоким (50%) содержанием частиц размером 0,1—0,05 мм, значительной (45—50%) пористостью, большим количеством макропор, карбонатные, неслоистые.

Третий подход используется наиболее широко. Его отличие от второго — учет условий залегания пород при обособлении лёсса. Однако детали этого подхода существенно неодинаковы у разных авторов. Их учет позволяет выделить три разновидности взглядов.

Первую из них, по-видимому, ввел в литературу в 1877 г. Ф. Рихтгофен, позже развивали И.И. Трофимов, Н.И. Кригер (1965). К числу признаков лёсса они относили не только пылеватость состава, желтовато-коричневый цвет, известковистость, наличие вертикальных трубчатых макропор, но и покровное

залегание, вертикальную трещиноватость, отсутствие слоистости прослоев песка и глины, способность обрушиваться в виде столбчатых отдельностей.

Вторая разновидность взглядов рассматриваемого подхода основана на отнесении к лёссам пылеватых пород, залегающих в разрезе между погребенными почвами. Авторы, принимающие ее (М.Ф. Веклич, А.А. Величко, А.И. Москвитин, М. Печи и др.), пишут о переслаивании лёсса и погребенных почв<sup>1</sup>. В частности, М. Печи рассматривает лёссовые толщи как состоящие из пачек лёссов и ископаемых почв.

Третью позицию этого подхода наиболее полно обосновал Н.И. Кригер. "По существу, в настоящее время в лёссоведении имеются два определения лёсса как горной породы и *лёсса как более сложной системы* (курсив мой. — В.Т.), особого естественно исторического тела, которое понятно нам только при изучении его в связи с окружающей средой. Эти два понятия ниже обозначаются как "лёсс-г" и "лёсс-s", т.е. соответственно как loess-rock и loess-system" (1984, с. 10). И далес: "Лёсс-г" представляет собой палевый известковистый пористый алеврит, определение которого может уточняться количественными показателями свойств и их статическими параметрами. Надо отметить, что эту породу можно называть лёссом лишь в случае, если она при надлежит лёссу-s как системе. Лёсс-s представляет собой природное тело, ареал которого строго определен географической средой. Он характеризуется покровным залеганием, отсутствием явно выраженной слоистости и прослоев галечников, наличием стратиграфически выдержанных ископаемых почв, состоит в основном из палевых *крупнопалевых известковистых супесей и суглинков* (курсив мой. — В.Т.), содержащих включения остатков наземной фауны и обладающих способностью менять свои свойства при изменении физико-географической обстановки. Эти суглинки и супеси, рассматриваемые независимо от среды, условий залегания, распространения и заключенной в них ископаемой фауны, являются лёссом. Оговорка о наличии у лёсса *просадочных свойств не требуется*, так как, во-первых, эти свойства лишь частный случай приспособляемости лёсса к окружающей среде, во-вторых, *лёсс-s может быть сложен и непросадочными породами* (курсив мой. — В.Т.) (1984, с. 10—12).

Понимая своеобразие данного подхода, необходимо отметить, что в практике исследований лёсс-s принято называть

---

<sup>1</sup> Н.И. Кригер (1984) называл этот подход "стратиграфическим принципом".

“лессовой толщей” или “толщей лёссовых пород”. Да и самим Н.И. Кригером лёсс-*s* рассматривается в специально составленной им таблице как “толща лёсса-г с прослоями почв”.

*Инженерно-геологическое определение.* Этот подход связывается нами в отличие от Н.И. Кригера (1965), с введением в определение лёсса важнейшего его инженерно-геологического свойства — просадочности. Само определение основано, как правило, на перечислении многих признаков лёсса как горной породы, но просадочность входит как обязательный признак.

Одним из первых подобный подход, по-видимому, использовал Н.И. Кригер. В 1951 г. он определял лёсс как крупнопылеватую крупнопористую мергелистую или известковистую просадочную породу, могущую иметь различный генезис. Однако уже в 1953 г. Н.И. Кригер считал нецелесообразным использование просадочности как критерия при определении лёсса.

Инженерно-геологическое по существу определение лёсса на основе учета 11 признаков ввел Г.А. Мавлянов. Он писал: “Слово “лёсс” означает горную породу с определенными физико-механическими свойствами и зачастую с определенным вещественным составом. В частности, *все лёссы независимо от их генезиса обязательно являются просадочными* (курсив мой. — В.Т.), а лёссовидные породы в зависимости их от генезиса могут быть просадочными или непросадочными. С этой точки зрения разделение мелкоземистых отложений на лёссы и лёссовидные породы является весьма необходимым и практически важным. Однако такое разделение требует от исследователя предварительного изучения породы для выяснения семи” (1958, с. 19) основных из 11 выделенных им признаков.

Столь же категоричен в определении был Е.М. Сергеев, который под лёссом предложил понимать “пылеватую (преимущественно крупнопылеватую) породу, *обладающую определенной величиной просадочности* (курсив мой. — В.Т.) благодаря большой пористости, слабым структурным связям, имеющую небольшую естественную влажность и содержащую небольшое количество глинистых частиц, среди которых минералы группы монтмориллонита не являются преобладающими” (1976, с. 5).

В другой работе Е.М. Сергеев с соавторами писали: “К лёссам относится однородная, неслоистая, сильно пылеватая (более 50%), пористая (более 42% часто имеющая макропоры), мало-влажная ( $W-W_{\text{мбв}}$ )<sup>1</sup> порода, *проявляющая просадку при зама-*

---

<sup>1</sup>  $W-W_{\text{мбв}}$  — влажность естественная и максимальной молекулярной влагоемкости.

чивании (курсив мой. — В.Т.). Лёсс подразделяется на просадочный при природном давлении и проявляющий просадочность при дополнительных нагрузках. Отмеченные показатели являются основными для его выделения.

Лёсс обычно имеет светлые тона окраски (чаще палевые), отличается карбонатностью (более 5%), в обнажениях образует вертикальные откосы. На участках, где лёссы замочены и утратили просадочность при природных давлениях, они описываются как деградированные лёссы, у которых со временем просадочность может восстанавливаться под влиянием гипергенных процессов” (Сергеев и др., 1982, с. 38).

По существу, аналогичную позицию занимает А.В. Минервин. Он, в частности, писал: “Можно допустить с учетом сложившейся в инженерной геологии и строительстве традиции применение термина “лёсс” к *просадочной* (курсив мой. — В.Т.) лёссовой породе с дальнейшим подразделением ее по степени просадочности, что будет определяться объективным наличием в породе модификаций воды и величиной прилагаемого давления” (Минервин, 1984, с. 23).

В понимании В.А. Полянина и К.Н. Колобова лёсс является пылевой, пористой (50—60%), *сильнопросадочной* (курсив мой. — В.Т.) породой (рис. 14 и табл. 9).

В монографии “Лёссовые породы СССР” (1986) к лёссу предложено относить лёссовую породу, “обладающую следующими дополнительными критериями: 1) *просадочными свойствами при природном давлении* ( $\varepsilon_{cl} \geq 0,01$ ) (курсив мой. — В.Т.); 2) малой гидрофильностью (лабораторная влажность, по А.К. Ларионову,  $W_L \leq 2,6\%$ ), обусловленной особым минеральным составом и преобладанием пылевой фракции; 3) слабыми водонеустойчивыми структурными связями, преимущественно зернисто-пленчатой и пылевато-пленчатой структурой” (с. 161).

Приведенный обзор позволяет сделать следующее заключение: 1) подходы к выделению лёсса, предложенные разными авторами, принципиально различны; 2) даже в рамках одного подхода содержание понятия “лёсс”, предложенное разными исследователями, не совпадает, причем нередко очень существенно; 3) при инженерно-геологическом подходе к определению содержания понятия “лёсс” во всех предложениях признается необходимость учета просадочности этих пород как обязательного признака; однако сам этот признак формулируется неодинаково (просадочная порода, просадочные свойства, просадочная порода при природном давлении, при дополнительных нагрузках, *сильнопросадочная порода*).



Лёссовидная порода. Это понятие также неоднозначно определяется в литературе. Обособляются по крайней мере три подхода, аналогичные рассмотренным выше применительно к понятию “лёсс”.

*Генетический подход.* Согласно этому подходу, лёссовидные породы являются породами не эолового генезиса. Так, В.А. Обручев в 1933 г. выделил “вторичные лёссовидные породы”, а в 1948 г. писал, что вторичные лёссовидные породы представляют мелкоземы самого различного генезиса.

Аналогичную позицию высказывали и А.И. Москвитин, М.И. Ломонович, И.И. Трофимов, Н.Н. Карлов и другие исследователи. В частности, М.И. Ломонович в 50-х годах неоднократно подчеркивал, что лёсс имеет эоловое происхождение, а лёссовидные породы — водное. И.И. Трофимов еще в 1950 г. за породами эолового генезиса предлагал закрепить термин “лёсс”, за остальными типами — “лёссовидные породы”.

В.В. Попов (1950) подходил к решению вопроса несколько по-иному. Он относил к лёссовидным пылеватые породы делювиального, аллювиального, водно-ледникового, морского, эолового и элювиального генезиса, не успевшие пройти полной стадии пустынного диагенеза, либо прошедшие почвеннодиагенетические преобразования после своего накопления. К этим же породам отнес и пылеватые образования, сформировавшиеся в криолитозоне.

*Литологическое определение.* Его находим в работах многих авторов. Так, Н.Я. Денисов (1953) писал, что большое распространение имеют породы, похожие на лёсс, но отличающиеся от него теми или иными признаками. Некоторые сходные по внешнему виду породы могут содержать включения крупнозернистого песка или гальки, другие — лишь весьма незначительное количество карбонатов и обладают пониженной пористостью. Подобные породы обычно относятся к лёссовидным.

Более конкретное определение предложил В.В. Попов (1960). По его мнению, лёссовидные породы это лёссовые породы, содержащие менее 50% крупнопылеватых частиц (0,05—0,01 мм).

С.С. Морозов (1964) предложил детальную классификацию лёссовидных пород, выделив среди них лёссовидные песок, супесь, суглинок и глины разной дисперсности. Подобный же подход использовал Б.Ф. Галай при выделении лёссовидных пород, подразделенных им на лёссовидные суглинки легкие, средние и тяжелые и лёссовидные глины. В целом лёссовидные суглинки характеризуются таким содержанием различных фракций: 0,1—0,01 мм — 28—60%; менее 0,005 мм — 30—60 и менее

0,002 мм — 24—48%. Для лёссовидных глин содержание соответственно составляет больше 28, 60 и 48%.

Предложены и другие литологические определения, основанные на использовании ряда признаков. Например, у Н.В. Воляника (1989) к лёссовидным относятся грунты лёссового облика (за исключением лёссов и лёссоподобных). М.П. Лысенко (1978) породы, сходные с лёссом и не обладающие в полном объеме его признаками, называл лёссовидными, считая, что они распространены более широко и намного разнообразнее лёсса по составу, облику и свойствам.

*Инженерно-геологическое определение.* В эту группу нами включены определения, в которых фигурирует просадочность как свойство, характерное или отсутствующее у лёссовых пород.

Одним из первых подобный подход использовал еще в 1933 г. Р.А. Токарь. Не употребляя термины “лёсс”, “лёссовые породы”, он выделил лёссовидные грунты в самостоятельную группу, которая включала в себя грунты, имеющие макроструктуру и теряющие устойчивость при замачивании под нагрузкой независимо от способа их образования (Ларионов и др., 1959; Кригер, 1984).

Более определенно о понятии “лёссовидные породы” писал, как уже отмечалось ранее, Г.А. Мавлянов (1958). С его точки зрения, лёссовидными породами называются те образования, которые по гранулометрическому составу и цвету аналогичны или близки к лёссу и обладают хотя бы незначительной макропористостью или образуют вертикальные отдельности. Лёссовидные породы в зависимости от их генезиса могут быть просадочными или непросадочными.

В работе Е.М. Сергеева с соавторами (Сергеев и др., 1982) к лёссовидным породам предлагается относить те разновидности лёссовых пород, которые не попадают под определение лёсса.

Р.С. Зиангиров и В.С. Быкова (1984) дали наиболее четкое определение рассматриваемого понятия. С их точки зрения, “лёссовидные грунты, обычно неоднородные (с включениями, линзами песчаного и крупнообломочного материала), слоистые, низкопористые (менее 42—41%, тонкомакропористые), часто влажные ( $W > W_{\text{ММВ}}$ ), непросадочные, либо проявляют незначительную просадочность при дополнительных нагрузках (курсив мой. — В.Т.). Они имеют разнообразные тона окраски и неоднородны по содержанию водно-растворимых солей, легко размываются, могут проявлять плыунность, плохо отдают воду (слабо дренируются)” (с. 15).

В последней сводке по лёссовым породам приводится следующее определение: “Лёссовидный грунт (порода) обладает сле-

дующими критериями: 1) *отсутствием просадочных свойств* при замачивании; 2) более высокой гидрофильностью ( $W_d \geq 2,6\%$ ); 3) преимущественно зернисто-агрегативной и агрегативной структурой, обуславливающей более прочные структурные связи" (Лёссовые породы..., 1986, с. 161).

Непросадочность является типичным свойством рассматриваемых пород и у А.В. Минервина. Он пишет: "К лёссовидным породам следует отнести *непросадочные* разновидности лёссовых образований, которые по существу относятся к классу пород *глинистых*" (курсив мой. — В.Т.) (Минервин, 1984, с. 23).

Таким образом, и в данном случае мы имеем ситуацию, аналогичную ранее рассмотренным. Даже при инженерно-геологическом подходе, в случае, когда критерии выделения лёссовидных пород более однотипны, нет четкости в определении содержания термина "лёссовые породы".

Лёссоподобная порода. Этот редко употребляемый термин также используется в разных смыслах. В.Ф. Краев и И.К. Шостак (1984) применили его практически в палеогеографическом смысле. Лёссоподобные породы в их понимании формировались в составе лёссовой формации в субкриоксеротическую климатическую подфазу. Они подобны лёссу, но не достигают его "оптимальных литологических кондиций: более выветрелые, более глинистые, более плотные. В их формировании наряду с эоловыми процессами существенную роль играли и процессы делювиального переотложения материала". Н.В. Воляник (1989) отнес к лёссоподобным лёссовые грунты в водонасыщенном состоянии. В монографии "Лёссовые породы СССР" (1986) к лёссоподобным грунтам (породам) отнесены мерзлые пылеватые образования, проявляющие термопросадки в результате оттаивания.

Лёсс деградированный. Под ним почти все понимают породу, морфологически близкую к лёссу, потерявшему способность к просадке в результате увлажнения и дополнительного уплотнения (Лёссовые породы..., 1986).

Лёсс видоизмененный. По В.В. Попову, к нему относится деградированный лёсс.

Лёссоид. Эта разновидность лёссовых пород выделена В.А. Поляниным и К.Н. Колобовым (1984). В его составе частицы размером 0,10—0,005 мм составляют более 80%; в их составе более 40% крупнопылеватых частиц (размером 0,05—0,01 мм). Пористость изменяется от 45 до 60%. Лёссоид является среднепросадочной породой (рис. 14).

Лёссолит. Он также выделен в работе В.А. Полянина и К.Н. Колобова и представляет средне- и слабопросадочную поро-

ду, содержащую более 50% частиц размером 0,10—0,005 мм и более 25% крупнопылеватых частиц. По составу среди лёссовитов выделяются супесчаные, суглинистые и глинистые (рис. 14).

Приведенный обзор свидетельствует, что в инженерной геологической литературе используется семь производных от слова “лёсс”. Каждая из них, так же как и сам термин “лёсс”, имеет в современной литературе несколько смысловых значений. В последние годы прослеживается достаточно четкая тенденция определять содержание термина “лёсс” и его производных с учетом не только состава и других литологических особенностей этих пород, но и просадочности как специфического их свойства.

Из всех рассмотренных выше позиций для инженерно-геологических работ наибольший интерес, представляют малоизвестные разработки В.А. Полянина и К.Н. Колобова. Их использование позволило бы придать существенно большую определенность терминологии, используемой инженерами-геологами. Именно из этой работы следует, что лёссовые породы — это породы, обладающие просадочными свойствами, а нелёссовые этим свойством не обладают (рис. 14).

Однако в этих предложениях есть и неопределенные позиции, в частности качественная оценка величины просадочности лёссовых пород, отсутствие связи ее величины с действующим давлением (природным или дополнительным). Кроме того, в своих предложениях авторы отказались от широко употребляемого термина “лёссовидные породы”.

Наши предложения (Трофимов, 1992) к определению “лёсс” и его производных. К *лёссовым породам* в инженерно-геологическом отношении следует относить континентальные пылевато-глинистые образования различного генезиса, содержащие более 50% пылеватых частиц (0,05—0,005 мм) по данным гранулометрического анализа и *проявляющие при замачивании просадочные свойства* (относительная просадочность больше или равна 0,01) при природном давлении или дополнительных нагрузках. Пылевато-глинистые грунты, содержащие более 50% пылеватых частиц, но не обладающие свойством просадочности, следует относить к категории глинистых; для отражения специфики состава их целесообразно называть *глинистыми пылеватыми*, или *лёссоподобными*. При таком подходе этот термин можно использовать и для наименования мерзлых пылеватых образований, как это предлагалось в монографии “Лёссовые породы СССР” (1986), поскольку к лёссовым они не относятся.

Лёссовые породы включают только лёссы и лёссовидные породы (грунты). Лёссы представляют собой континентальные

пылевато-глинистые образования различного генезиса, содержащие более 50% пылеватых частиц по данным гранулометрического анализа и *проявляющие просадочные свойства (при замачивании) при действии природного давления*. В отличие от них лёссовидные породы *проявляют просадочные свойства при замачивании только под действием дополнительных нагрузок*.

И лёссы, и лёссовидные породы могут в случае необходимости подразделяться по разным признакам. В частности, с использованием классификации СНиП они могут подразделяться на гранулометрические разновидности (супесчаные, суглинистые, глинистые), как и глинистые грунты. Их можно подразделять по величине относительной просадочности, степени засоленности или другому важному, исходя из цели исследования, показателю.

Термин “деградированный лёсс” также находит свое место в предлагаемой системе. *Деградированный лёсс* — это лёсс, просадочные свойства которого реализованы в результате увлажнения под собственным весом толщи. В подавляющем большинстве случаев лёсс при этом превращается в лёссоподобную породу; однако в ряде случаев он может трансформироваться в лёссовидную породу. В первом случае следует для однозначности использовать словосочетание “деградированный лёсс — лёссоподобная порода”, во втором — “деградированный лёсс — лёссовидная порода”.

В заключение отметим, что предложенная система понятий термина “лёсс” и его производных является более четкой по сравнению с существующей. Она позволяет однозначно обособить лёссовые породы от остальных категорий дисперсных грунтов по наличию просадочности как важнейшего свойства, однозначно разделить лёссы и лёссовидные породы.

## ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ ПРОСАДОЧНОСТИ ЛЁССОВЫХ ПОРОД

---

### 2.1.

#### Общие положения вопроса о генезисе просадочности лёссовых пород

**Постановка и история вопроса.** Формирование просадочности — геологический процесс. Он протекает неодинаково в разных геологических условиях и обязательно включает несколько этапов: 1) накопления элементарного слоя пылеватого осадка (в разных климатических обстановках и под влиянием разных генетических факторов); 2) преобразования осадка этого слоя в ходе раннего субаэрального диагенеза в просадочную (а) или непросадочную (б) породу; 3) последовательного накопления просадочных пород налегающих друг на друга элементарных слоев и образование толщи просадочных лёссовых пород (а) или накопления толщи непросадочных пород и их дальнейшего преобразования в субаэральных условиях в просадочные в ходе прогрессивного или регрессивного (гипергенные изменения) литогенеза (б), иных природных (в) и техногенных (г) процессов, 4) консервации просадочности и сохранения толщ просадочных лёссовых пород в течение геологического или хотя бы исторического времени. Из этого следует вывод, что просадочность лёссовых пород по отношению ко времени формирования толщ может быть одновременно образовавшейся, т.е. и сингенетической и эпигенетической в общегеологическом понимании (Трофимов, 1980; и др.).

В истории изучения просадочности лёссовых пород четко обособляются два направления. Первое из них тесно, напрямую связывает формирование просадочности с определенными по генезису пылеватыми отложениями (просадочный лёсс — золо-

вые отложения, просадочный лёсс — элювиальная порода и т.п.), причем некоторые сторонники такого подхода, например Е.М. Сергеев (1976) и другие авторы (Сергеев и др., 1989) распространяют его на всю жизнь лёссовой породы, начиная от ее осадконакопления и литификации до современного состояния. Другая основная группа исследователей (В.П. Ананьев, Б.Ф. Галай, Н.Я. Денисов, В.И. Коробкин, Н.И. Кригер, Г.А. Мавлянов, А.В. Минервин, В.Т. Трофимов и др.) убедительно показала, что просадочными могут быть отложения разного генезиса. Учитывая такие глубокие различия в этой сфере, сформулируем свое понимание содержания понятий “генезис лёссовых пород” и “генезис просадочности лёссовых пород”.

Под *“генезисом лёссовых пород (лёссов)”* следует понимать, как это принято в геологической теории и практике, способ формирования пылеватых (лёссовых) отложений (и образований, например, элювиальных), в первую очередь определяемый способом накопления первоначального пылеватого осадка. *“Генезис просадочности лёссовых пород (лёссов)”* — это способ формирования просадочности пород в ходе прогрессивного или регрессивного литогенеза. Первое из этих понятий является общегеологическим, второе — специальным, сугубо инженерно-геологическим (Трофимов, 1990, 1997).

Генезис лёссовых пород может быть различным. Сейчас это общепризнано. Чаще всего эти породы представлены эоловыми, пролювиальными и делювиальными типами отложений. Кроме того, это могут быть элювиальные образования, сформировавшиеся на различных по возрасту, генезису и составу отложения. Выяснение генезиса лёссовых пород — задача общегеологическая. Ее решают не только инженеры-геологи, но и геологи, геоморфологи.

Если лёссовые отложения (осадки и породы) разного генезиса, занимающие разное геоморфологическое положение, приобретают одно и то же специфическое свойство — просадочность, то естественно возникает вопрос: каков же процесс (процессы), путь (пути) формирования этого свойства? Одинаков ли он или различен в геологическом и физико-механическом плане у отложений разного генезиса?

Одним из первых предпринял попытку решить этот вопрос Н.Я. Денисов (1940—1956). В своих работах он высказал гипотезу и, исходя из нее, создал логико-графические модели формирования просадочности лёссовых пород эолового, делювиального, пролювиального и аллювиального генезиса. Важно подчеркнуть, что в первых трех случаях Н.Я. Денисов рассматривал формирование просадочности в ходе осадконакопления и ранне-

диагенетических преобразований эолового, делювиального, пролювиального осадка, т.е. в ходе прогрессивного литогенеза на этапе преобразования осадка в слабо увлажненную просадочную породу. Анализируя же процесс применительно к аллювиальным отложениям, Н.Я. Денисов обсуждал преобразование уже сформировавшейся сильно увлажненной породы в слабо увлажненную просадочную породу.

Если исходить из содержания ранее приведенного понятия "генезис просадочности лёссовых пород", легко прийти к выводу, что Н.Я. Денисов гипотетически рассматривал принципиально различные пути формирования просадочности у пылеватых отложений разного генезиса. При этом сам Н.Я. Денисов не называл их (пути) и не использовал понятие "генезис просадочности лёссовых пород".

Позже были предложены новые гипотезы (А.М. Воронин, А.А. Коновалов, А.В. Минервин, Е.М. Сергеев и др.), в которых формулировались (постулировались) иные пути формирования просадочности лёссовых пород. Почти во всех них рассматривался процесс (путь) преобразования непросадочной породы в породу просадочную.

Анализ всех этих гипотез, а также появившихся экспериментальных данных показал, что по своему генезису просадочность лёссовых пород может быть принципиально различна. *Первый ее тип* формируется у отложений разного генезиса непосредственно в ходе накопления и раннего субэразального диагенеза элементарных слоев и толщ пылеватых осадков в аридных условиях. *Второй генетический тип просадочности* связан с приобретением лёссовыми породами этого свойства уже после завершения осадконакопления и превращения пылеватого осадка первоначально в непросадочную породу, в ходе дальнейшего развития прогрессивного или регрессивного литогенеза, преобразования толщ эпикриогенных пород в специфических условиях или под влиянием техногенных процессов. Первый из этих типов — просадочность как *сингенетическое* свойство, второй — просадочность как *эпигенетическое* свойство лёссовых пород (Трофимов, 1980). Позже стали использовать термины "*сингенетическая просадочность*" и "*эпигенетическая просадочность*" лёссовых пород.

С этими предложениями согласились многие исследователи (Галай, 1985; Грунтоведение, 1983; Коробкин, 1989; Мавлянов, 1989; и др.), термины вошли в литературу. Однако Н.И. Кригер, выступая как официальный оппонент на защите докторской диссертации Н.В. Воляника, поставил под сомнение возможность формирования сингенетической просадочности, хотя в основ-



ных его публикациях такого отрицания не было. Н.И. Кригер (1989) писал об эфемерности просадочности как свойства, о соответствии ее величины термовлажностным условиям природной обстановки (географической среды), и лишь в одной из работ (тезисах), рассматривая происхождение просадочных свойств лёсса и лёссовидных пород, отметил, что просадочность “сильно зависит от природного давления и поэтому всегда является *постгенетическим* (курсив мой. — В.Т.) свойством толщи (породы в толще)”.

Такая ситуация заставила нас вернуться к обсуждению, казалось бы, решенного вопроса. При этом было сделано два замечания: 1) терминология в любой области знания — вещь достаточно условная, но требующая четкого определения содержания каждого понятия; 2) в приведенной цитате Н.И. Кригера, по существу, “задаются” два совершенно различных, но очень тонких вопроса — о *генезисе просадочности* как специфического свойства лёссовых пород и о *генезисе величины просадочности* этих пород (Трофимов, 1997).

На первый взгляд это может показаться парадоксальным. Но такая постановка вопроса правомерна, и позже мы покажем это. Тут же подчеркнем, что Н.И. Кригер использовал в отношении просадочности термин “постгенетическое” свойство, не являющийся аналогом “эпигенетического” свойства.

Так что же понимается под сингенезом, сингенетическим и эпигенетическим в смежных геологических науках, и прежде всего в литологии и криолитологии, где эти термины используются наиболее широко?

**Представления о сингенезе в смежных геологических науках.** Сингенез (от греческого *syn* — вместе и *genetos* — рожденный) понимается исследователями по-разному. В литологической литературе в этом плане обособляются три подхода.

*Первый* из них наиболее строго сформулирован в работах А.Е. Ферсмана (Геологический словарь, 1978) и М.С. Швецова (1958), согласно которым сингенез представляет собой процесс образования минералов или иных особенностей одновременно и совместно с образованием осадка.

*Второй* подход связан с именами Л.В. Пустовалова (1941) и Л.Б. Рухина (1969). Первый из них сингенезом называл стадию преобразования осадка в осадочную породу. В частности, им написано так: “Стадия формирования осадочной породы (раннего диагенеза или сингенеза) характеризуется взаимодействием составных частей осадка между собой и с окружающей их средой, стремящихся к установлению между ними равновесия” (Пустовалов, 1941, с. 386).

Л.Б. Рухин (1969) выделял синтез как особую стадию в формировании осадочных пород, следующую за стадией образования осадка и предшествующую стадии диагенеза. Явления сингенеза происходят “в самой верхней части осадка... Мощность зоны сингенеза, характеризующаяся чаще всего окислительной или нейтральной средой, не превосходит обычно 10—15 см”<sup>1</sup> (с. 290). Диагенез же, по Л.Б. Рухину, охватывает не тонкий поверхностный слой уже сформировавшегося осадка, а всю толщу осадка.

*Третий* подход прослеживается в работах Н.Б. Вассоевича, Н.М. Страхова и Н.В. Логвиненко. Последние сингенез считают термином свободного пользования. Н.Б. Вассоевич содержание этого термина также понимал широко — как процессы, протекающие одновременно с образованием минералов, пород, скоплением полезных ископаемых.

Понятия “сингенез”, “сингенетический” широко используются и в криолитологии, геокриологии. В работе А.И. Попова с соавторами (1985) показано, что сингенез в криолитологическом плане понимается как промерзание, сопутствующее литификации по мере накопления осадка, а сингенетическое промерзание — как промерзание в ходе осадконакопления. “Сингенетический тип криолитогеоза предполагает нестационарность земной поверхности (постепенное повышение ее в результате осадконакопления осадков).

При формировании сингенетических вечномерзлых толщ основание деятельного слоя в процессе накопления осадков переходит в вечномерзлое состояние, наращивая таким образом вечномерзлую толщу. Поэтому любой верхний слой свежотложенного осадка *по мере его погребения новыми слоями осадка по прошествии некоторого времени* станет вечномерзлым... Сингенетическое промерзание всегда представляет процесс первичного или ведущего *диагенеза накапливающихся осадков* (курсив мой. — В.Т.), является главным фактором литификации” (Попов и др., 1985, с. 172 и 174).

Напомним также, что в вертикальном разрезе формирующейся сингенетической многолетнемерзлой толщи выделяются три горизонта: 1) сезонного криогенеза; 2) активного криогенеза, в котором преобразование уже мерзлых пород связано главным образом с формированием повторно-жильных льдов; 3) относительной консервации криогенеза (в этом горизонте характеристики пород не остаются совершенно постоянными, так как идет перекристаллизация льда).

---

<sup>1</sup> Для аквальных образований.

Эпигенез — это прежде всего *вторичные* “процессы, ведущие к любым последующим изменениям и новообразованиям минералов и *горных пород*” (курсив мой. — В.Т.) (Геологический словарь, 1978, с. 439). Из этого следует, что эпигенетическое явление вторичное, возникающее после образования какого-либо минерала, горной породы, месторождения.

Эпигенетический тип криолитогенеза “предполагает относительную стационарность земной поверхности либо денудацию поверхности — снос горных пород. Частным случаем эпигенетического типа криолитогенеза является вторичное промерзание протаявших пород” (Попов и др., 1985, с. 120).

**Сингенетическая и эпигенетическая просадочность лёссовых пород элементарного слоя и толщи.** Оценим с точки зрения изложенного предложения о выделении просадочности как син- или эпигенетического свойства лёссовых пород. Напомним, что формирование толщ просадочных лёссовых пород с инженерно-геологической точки зрения происходит в четыре этапа (см. ранее). Эти этапы включают серию подпроцессов единого геологического процесса, приводящих к формированию просадочных пород элементарного слоя, а затем и толщи лёссовых пород. По существу, главный итог этого процесса — образование толщ высокопористых просадочных маловлажных пылеватых пород со специфическим глобулярным микростроением и наличием контактов цементационного и переходного типов. Однако просадочность может сформироваться на разных этапах жизни породы.

Рассмотрим особенности каждого из названных этапов на примере образования золовых лёссовых пород. Первый из этапов — накопление пылеватого материала элементарного слоя, который формируется, предположим, в итоге одной пыльной бури. Скопление такой золовой пыли может превратиться в связный грунт только после его увлажнения талыми или атмосферными водами и последующего высыхания (второй этап). Экспериментально доказано (Галай, 1985; Трофимов, 1986а; и др.), что только этот процесс увлажнения пылеватого сыпучего осадка и его высыхания<sup>1</sup> приводит к образованию высокопористой про-

---

<sup>1</sup> Еще М.С. Швецов (1958) придавал очень важное значение субэкральному высыханию осадка на пути его превращения в породу на стадии раннего диагенеза (точнее, экзодиагенеза). В частности, он писал, что процессы этой стадии “при всем своем различии в разных условиях, обычно вследствие обезвоживания (высушивания), незначительного сдавливания, небольших химических изменений и перекристаллизации, делают осадок, первоначально пылеватый, рассыпающийся или текучий, если не совсем твердым, то все же более связанным (лёсс, глина, песок)” (с. 33).

садочной породы. Это обусловлено, как впервые показал Н.Я. Денисов (1953) почти 50 лет назад, более медленным уплотнением подсыхающего, ранее увлажненного материала элементарного слоя по сравнению с полностью водонасыщенным.

В ходе развития геологического времени этот процесс повторяется многократно. При накоплении любого нового слоя осадка предыдущий элементарный слой переходит в погребенное состояние. Последовательно формируется толща лёссовых пород (третий этап).

В условиях сухого климата увлажнение накапливающихся осадков в каждом элементарном слое и образовавшихся из них связанных грунтов (уже после одного цикла увлажнения-дегидратации) происходит периодически под воздействием атмосферной влаги, которая промачивает лишь верхнюю часть разреза толщи, обычно даже в весенний период не превышающую 1—1,5 м. В соответствии с этим в формирующейся толще золотых отложений обособляются два горизонта: верхний, охватывающий часть толщи от поверхности новообразованного осадка каждого элементарного слоя до глубины однократного или обычно многократного проникновения атмосферной влаги, и нижний, залегающий глубже. В пределах первого из них пылеватый осадок, а затем и связный грунт находятся в условиях переменного увлажнения-высыхания. Молодая порода нижнего горизонта, находящаяся вне влияния атмосферных вод, имеет малую влажность и достаточно значительную прочность (Денисов, 1953; Кригер, 1986).

В процессе накопления осадка поверхность толщи постепенно поднимается. Одновременно повышается и граница, разделяющая толщу на два указанных горизонта. Осадок и молодая порода в пределах верхнего из них периодически увлажняются и приобретают в аридном климате на короткий срок состояние, оптимальное (или близкое к нему) для уплотнения. Но в это время они (осадок и молодая порода) испытывает очень маленькое давление от веса вышележащих отложений. Часть же толщи, залегающая ниже этой границы, испытывает значительно большее давление от перекрывающих их образований, но, поскольку ее влажность мала, она не может эффективно уплотняться из-за влияния структурного сцепления и сохраняет высокую пористость (4-й этап). В итоге в ходе седиментации и раннего субаэрального диагенеза формируются высокопористые маловлажные недоуплотненные толщи лёссовых образований золотого генезиса, обладающие просадочными свойствами.

По своей природе эта просадочность отнесена нами к сингенетическому типу. Правомерно ли это? Оценим такой подход с позиций, принятых в литологии и криолитологии.

С точки зрения позиции, предложенной Л.В. Пустоваловым (1941), такой подход правомерен. Аналогичный вывод может быть сделан и исходя из работ Л.Б. Рухина (1969); это целиком согласуется с выводами Н.Б. Вассоевича.

Правомерность отнесения просадочности эоловых отложений, сформировавшейся описанным способом, к сингенетической доказывает и сравнение с закономерностями сингенетического промерзания отложений. В обоих случаях преобразование нового элементарного слоя осадка происходит в условиях продолжения осадконакопления, в условиях нестационарности земной поверхности (постепенного ее повышения за счет накопления новых слоев осадка). И промерзание осадка, и его увлажнение-высыхание представляют собой процессы превращения осадка в породу с определенными свойствами, причем в обоих случаях свежотложенный осадок приобретает эти свойства по мере его погребения новыми слоями по прошествии некоторого времени. И если сингенетическое промерзание в этих временных особенностях представляет процесс первичного диагенеза накапливающихся осадков и служит главным фактором их литификации, то совершенно аналогичным в этом плане является процесс увлажнения пылеватого сыпучего эолового осадка и последующей его дегидратации в ходе превращения в слабую просадочную породу. Да и в вертикальном разрезе сравниваемых толщ, по существу, выделяются одни и те же горизонты — верхний, в пределах которого процессы криолитогенеза или увлажнения (дегидратации) протекают активно, и нижний, характеризующийся консервацией приобретенных свойств.

Оценим с этих же позиций особенности формирования просадочности у делювиальных и пролювиальных отложений. Образование толщ лёссовых пород этих генетических типов, так же как и эоловых, происходит путем последовательного наслоения одних элементарных слоев на другие.

В ходе накопленных полностью водонасыщенных пылеватых осадков рассматриваемого генезиса, их высыхания в условиях аридного климата формируется просадочный элементарный слой (Денисов, 1953; Мавлянов, 1989; Трофимов, 1990а). При последующем его увлажнении после перекрытия новым слоем водонасыщенных образований и их совместном высыхании происходят процессы уплотнения, очень близкие к описанным ранее для эоловых отложений. В этом случае также формируется разрыв во времени периода действия на пылеватые высохшие и

уже упрочившиеся породы возросшего давления от веса выше-лежащих образований и периода существования оптимальных по степени увлажнения условий их уплотнения. В итоге в ходе седиментации и раннего субаэрального диагенеза при прогрессивном накоплении толщи формируются недоуплотненные лёссовые делювиальные и пролювиальные породы, обладающие просадочными свойствами, причем величина их просадочности обычно ниже по сравнению с золовыми.

Просадочность и в этом случае является, с нашей точки зрения, *сингенетическим свойством и каждого элементарного слоя лёссовых пород, и их толщи в целом.* По существу, все позиции обоснования такого вывода аналогичны тем, которые изложены ранее при рассмотрении генезиса просадочности золовых лёссовых отложений.

Экспериментально доказано, что пылеватый осадок сформировавшийся в чаще водохранилища аридной зоны и высохший после сезонной сработки его уровня в условиях жаркого летне-осеннего времени (в течение августа—сентября), приобрел просадочные свойства (Трофимов и др., 1987). И в этом случае просадочность формируется в ходе осадконакопления и раннего субаэрального диагенеза. И она также относится к категории сингенетической.

Таким образом, можно констатировать, что образование высокопористых *недоуплотненных* маловлажных пылеватых пород со специфическим глобулярным строением, наличием контактов цементационного и переходного типов и обладающих просадочностью связано с *этапом прогрессивного накопления отложений разного генезиса в аридных условиях.* Просадочность лёссовых пород элементарного слоя и толщи, слагаемой совокупностью таких слоев, формируется *в ходе осадконакопления и раннего диагенеза осадков при условии постепенного повышения кровли толщи в результате осадконакопления.* И просадочность этого типа по отношению ко времени образования слоя в данной толще правомерно рассматривать как сингенетическое свойство. Это полностью согласуется, как показано ранее, с позицией, принятой в смежных с инженерной геологией науках (литологии, криолитологии).

Совершенно по-иному формируется просадочность как эпигенетическое свойство лёссовых пород. Главные отличия: 1) ее образование происходит в ходе прогрессивного или регрессивного литогенеза уже *существующих горных пород* (а не свежотложенных осадков); 2) формирование просадочности этого типа происходит при относительной стационарности поверхности данного геоморфологического элемента или даже его денудации.

В этом плане весьма характерны особенности формирования просадочности аллювиальных отложений. При накоплении в пределах поймы (1-й этап) аллювиальный осадок вновь образующегося элементарного слоя водонасыщен в течение длительного срока даже в аридной зоне. Будучи перекрытым новыми слоями осадка, он все равно остается водонасыщенным (или по крайней мере сильно увлажненным). В этих условиях он эффективно уплотняется, его пористость соответствует давлению, передаваемому вышележащими отложениями; следовательно, аллювиальная порода не может обладать просадочностью (2-й и 3-й этапы). В ходе геологического развития пойменные условия сменяются обстановкой первой надпойменной террасы. Это обуславливает изменение термовлажностного режима толщи, последующее прогрессивное иссушение ее в аридных условиях и упрочнение аллювиальной породы (продолжение 3-го этапа). И в этих условиях порода будет непросадочной; более того, она окажется переуплотненной вследствие усадки и при увлажнении будет набухать при действии только природной нагрузки. Если же на этих маловлажных породах будет возведено инженерное сооружение, то под его весом и весом пород вышележащей толщи они будут уплотняться (завершение 3-го этапа, вариант "г"). Процесс их уплотнения будет замедленным по сравнению с уплотнением в водонасыщенном состоянии вследствие структурированности аллювиальной маловлажной породы, и через какой-то промежуток времени вследствие этого возникает *эпигенетическая недоуплотненность* рассматриваемых пород по отношению к действующей нагрузке. В этом состоянии, будучи увлажненными, они неизбежно дадут просадку, эпигенетическую по своему происхождению.

Еще более контрастно проявляется эпигенетическая природа просадочности, образующаяся в ходе гипергенного преобразования изначально пылеватых пород разного возраста и генезиса. Экспериментально работами В.С. Бондаренко, А.М. Воронина, В.И. Коробкина, А.В. Минервина, В.Т. Трофимова доказано, что под влиянием процессов выветривания, вторичных по своей природе, ранее сформированные непросадочные пылеватые породы разуплотняются, иссушаются и во вновь сформированном состоянии приобретают просадочные свойства. Последние могут проявляться в одних случаях под действием только дополнительной нагрузки, в других — и под влиянием природной нагрузки.

Таким образом, можно констатировать, что просадочность, являющаяся следствием формирования специфической структуры и состояния лёссовых пород, образуется на разных этапах

жизни осадка и породы. И в элементарном слое, и в толщах она может формироваться и как син-, и как эпигенетическое свойство.

Необходимо отметить, что сингенетическая просадочность во многих частях реальных разрезов может быть “усилена” наложением эпи-генетической. В этой ситуации генезис просадочности сложный — эпи-сингенетический или, наоборот, синэпигенетический. В частности, в циклически построенных толщах эоловых, делювиальных и пролювиальных лёссовых пород в нижней части каждого циклита просадочность является син-генетическим его свойством, в средней — таковой или же эпи-сингенетической, а в верхней, под горизонтами современной или погребенных почв, — син-эпигенетической (Трофимов, 1985, 1996).

**О генезисе величины просадочности лёссовых пород.** Теперь рассмотрим вопрос о генезисе величины просадочности, которая фиксируется исследователем в современных условиях. Прав Н.И. Кригер (1989), говоря о том, что ее численное значение зависит от величины нагрузки, передаваемой на лёссовый грунт в момент замачивания (природная нагрузка — частный случай этой ситуации). И в этом предложении, по существу, заложен ответ на поставленный ранее вопрос: величина просадочности лёссовых пород является их эпигенетическим свойством, поскольку современная нагрузка, как правило, не связана прямо с сингенетическими процессами (в рассмотренном их понимании).

Таким образом, сама просадочность может быть и син- и эпигенетическим свойством, а ее величина — только эпигенетична. Нет ли тут противоречия? Обсудим это соотношение.

Просадочность пород элементарного слоя как сингенетическое свойство образуется, как показано ранее, в ходе осадконакопления и раннего диагенеза в субаэральных условиях. Именно на этом этапе формируется специфическая недоуплотненная структура маловлажных лёссовых грунтов. И тут главное — наличие просадочности как особого свойства. С точки зрения природы этого свойства не важно, какова величина показателя, характеризующая его (по существу, ответ “да—нет”, но не “сколько”). Не важно, при какой нагрузке — природной или дополнительной — это свойство лёссовых грунтов проявляется. Главное — оно сформировалось в ходе литогенеза пылеватых осадков различного происхождения.

В ходе геологического развития такие просадочные породы элементарного слоя (и формируемой ими толщи) могут быть



захоронены толщей новообразованных отложений. И если просадочные свойства, сингенетические по своей природе, будут законсервированы, то по мере роста веса вышележащих пород величина просадочности будет прогрессивно возрастать. Ее значение никак не связано с эпохой формирования специфической структуры лёссовых пород и потому явление это, безусловно, эпигенетическое.

Особенно четко проявляется эпигенетичность величины просадочности в циклично построенных толщах, в которых возраст слоя (толщи) с сингенетической просадочностью (например, нижнего или второго циклита) совершенно не связан с современным весом перекрывающих их отложений (например, трех залегающих выше и позже образовавшихся циклитов). Однако именно вес этих отложений определяет современную величину просадочности пород указанного слоя (толщи).

Столь же очевидна эпигенетичность величины просадочности лёссовых пород, которая проявляется только при действии дополнительной нагрузки. И уже совсем однозначна такая интерпретация величины просадочности для всех разрезов лёссовых пород, просадочность которых сформировалась как эпигенетическое свойство.

Таким образом, анализ закономерностей формирования просадочности лёссовых пород показал, что просадочность действительно может сформироваться и как сингенетическое и как эпигенетическое свойство. Первый ее тип характерен для эоловых, делювиальных и пролювиальных отложений и формируется в ходе осадконакопления и раннего субазального диагенеза в пределах элементарного слоя и слагаемой такими слоями толщи в условиях постепенного повышения кровли последней в результате продолжающегося субазального осадконакопления. В отличие от этого величина просадочности, определяемая экспериментально при инженерно-геологических исследованиях, по генезису эпигенетична.

## 2.2.

### **Систематика выдвинутых гипотез формирования просадочности лёссовых пород**

Количество гипотез о “генезисе просадочности лёссовых пород”, несмотря на огромное практическое значение этого их специфического свойства, в отличие от гипотез и теорий “генезиса лёссовых пород”, невелико. Первая их систематика была осуществлена нами в 1980 г. (Трофимов, 1980). В ней, по

существо, было выделено две группы и три вида гипотез. В качестве групп обособлялись гипотезы, постулирующие формирование просадочности лёссовых пород как сингенетического (первая группа) или эпигенетического (вторая группа) их свойства. К первой из них была отнесена гипотеза Н.Я. Денисова о формировании недоуплотненных эоловых, делювиальных и пролювиальных отложений, ко второй — гипотеза Н.Я. Денисова о формировании просадочности у аллювиальных отложений, гипотеза А.В. Минервина и Е.М. Сергеева (1961, 1964) о гипергенной природе просадочности пород разных генетических типов. (Эти же построения были использованы нами в 1986 г.)

В 1989 г., учитывая новые выдвинутые гипотезы, было расширено описанное классификационное построение (Трофимов, 1990). В первую группу дополнительно отнесена гипотеза А.В. Минервина (1982) о формировании просадочности у сингенетически промерзших пылеватых осадков при их иссушении путем сублимации льда или ускоренного испарения влаги при геологически быстрой деградации многолетней мерзлоты, во вторую — его же гипотеза о формировании просадочности в связи с разуплотнением пород в ходе эпигенетического промерзания и их дегидратации при сублимации льда или испарения влаги все при той же быстрой дегидратации многолетней мерзлоты.

В последнее время оригинальная гипотеза формирования просадочности лёссовых пород была высказана А.А. Коноваловым (1997), который привлек для объяснения образования данного феномена динамику образования и разрушения газогидратных залежей. Кроме того, гипотеза о формировании эпигенетической просадочности в ходе гипергенных процессов, включая криогенную составляющую, постепенно дифференцировалась на две: гипергенно-дегидратационно-разуплотнительную и криоэлювиальную. С учетом этого систематика гипотез о генезисе просадочности лёссовых пород, содержание которых описывается в следующем разделе, приведена в табл. 10. В дополнение отметим, что в последние годы авторы новых гипотез осуществляли все больший и больший “уклон” в сторону привлечения сложных криогенных и посткриогенных процессов для объяснения путей формирования просадочности лёссовых пород, которые в области распространения многолетнемерзлых пород сейчас не встречаются. Долго проработав в области развития многолетнемерзлых пород, видим в этом определенное стремление авторов не только к гипотетичности, но и к экзотичности своих построений.

Таблица 10

## Систематика гипотез о генезисе приспособленности летсовых пород

Группа гипотез	Виды гипотез			Генетические типы породных отклонений, к которым применима гипотеза
	название гипотезы (по В.Т. Трофимову)	автор(ы)	год выдвижения	
Гипотезы, рассматривающие происхождение как сингенетическое свойство	детиатриационно-неадаптивная	Н.Я. Денисов	1949—1951	эволюционные и проэволюционные
	хромосинтетическо-субимационная	А.В. Минервин, Н.Н. Комиссарова	1982—1983	сингенетически промерзшие породы разного генезиса
	детиатриационно-адаптивная	Н.Я. Денисов	1949—1951	адапционные
Гипотезы, рассматривающие происхождение как энгенетическое свойство	гипергенно-гипертрисационно-разуплотнительная	А.В. Минервин, А.В. Минервин и Е.М. Сергеев, В.Т. Трофимов	1940 1964 1963—1968	четвертичные дисперсные группы разных генетических типов
	хромозомальная	А.В. Минервин, Е.М. Сергеев	1964	осадочные породы разных генетических типов
	хромосинтетическо-субимационная	А.В. Минервин	1982	эпигенетически промерзшие породы любого генезиса
хромосинтетическая	газоциклическая	А.А. Коналов	1997	осадочные породы любого генетического типа

Следует подчеркнуть, что гипотеза А.В. Минервина и Н.Н. Комиссаровой (1983) отнесена к первой группе, поскольку в основе ее лежит идея о том, что недоуплотненность пород по отношению к действующей нагрузке (их весу) формируется непосредственно в ходе накопления сингенетического промерзания осадков. Иссушение же неуплотненных пород, также обуславливающее формирование просадочности, происходит гораздо позже (даже в геологическом времени). Это, бесспорно, делает отнесение этой гипотезы к первой группе достаточно условным. В принципе, просадочность лёссовых пород, сформированная в соответствии с механизмом, постулированным этой гипотезой, является эпи-сингенетической (Трофимов, 1998а).

### 2.3.

#### **Краткая характеристика содержания гипотез о генезисе просадочности лёссовых пород**

**Гипотеза Н.Я. Денисова о формировании сингенетической просадочности эоловых лёссовых пород.** Н.Я. Денисов (1951, 1953), рассматривая процесс образования эоловых лёссовых пород, отмечал, что скопления эоловой пыли могли превратиться в связную породу только после увлажнения и высыхания<sup>1</sup>. В условиях сухого климата увлажнение накапливающихся осадков происходит периодически под воздействием атмосферной влаги, которая промачивает толщу на глубину, обычно не превышающую 1—1,5 м. В соответствии с этим в накапливающейся толще с известной долей условности обособляются два горизонта — верхний, охватывающий часть толщи от верхней поверхности осадка до глубины проникновения атмосферной влаги, и нижний, залегающий глубже. В пределах верхнего горизонта осадок находится в условиях переменного увлажнения и высыхания: в период выпадения дождей и некоторое время после него он обладает высокой влажностью и низкой прочностью, в остальное время — малой влажностью (вследствие испарения воды) и достаточно высокой прочностью. Осадок, точнее, уже совсем молодая порода нижнего горизонта находится вне влияния атмосферных вод; воздействие же испарения здесь сказывается.

---

<sup>1</sup> В связи с этим в составе дегидратационно-недоуплотнительной гипотезы Н.Я. Денисова применительно к эоловым лёссовым породам следовало бы выделить “гидратационно-дегидратационно-недоуплотнительную” ее ветвь, в отличие от собственно “дегидратационно-недоуплотнительной” ветви, свойственной пролювиальным и делювиальным отложениям.

Поэтому в пределах нижнего горизонта эта порода постоянно обладает малой влажностью и в целом относительно высокой прочностью.

В процессе накопления осадка поверхность толщи постепенно поднимается. Одновременно повышается и граница, разделяющая толщу на два вышеуказанных горизонта. Осадок в пределах верхнего из них периодически (во время увлажнения) приобретает состояние, оптимальное для уплотнения. Но в это время он испытывает настолько малое давление, создаваемое в этом слое самим осадком, что его плотность существенно возрасти не может. Часть же толщи, залегающая ниже этой границы, испытывает значительно большее давление от вышележащих осадка и породы; но поскольку ее влажность мала, она не может эффективно уплотняться (сохраняет высокую пористость) из-за влияния сцепления упрочнения. Последнее возникает в ходе испарения воды в порах осадка и отложений на контактах и поверхности частиц углекислого или сернокислого кальция, других солей. В возникновении этого сцепления и структурных особенностей породы в целом определенная роль принадлежит агрегации частиц осадка при его высыхании. В итоге из пылеватого осадка в ходе субаэрального диагенеза на самом первом этапе формируется толща недоуплотненных лёссовых пород.

“Сцепление упрочнения может задержать уплотнение не только осадков, образующихся эоловым путем. Породы, в той или иной мере недоуплотненные, могут возникать и при приносе материала делювиальным и пролювиальным путями. Для этого достаточно: а) чтобы осадок, появившийся в период выпадения дождей и таяния снегов, мог полностью просыхать впоследствии и б) чтобы толща ранее выпавших осадков, увлажненных в период отложения следующей порции осадка, также могла просыхать. Эти требования сводятся к тому, чтобы в сухое время верхняя часть толщи могла высыхать и цементироваться пленками солей, выпадающих из растворов. Это возможно, если накопление осадков происходит в условиях сухого климата” (Денисов, 1951, с. 37).

Приведенные выше соображения показывают, что в истории формирования лёссовых пород эолового (делювиального и пролювиального) генезиса в условиях аридного климата период проявления высокого давления от веса вышележащих образований не совпадает с периодом существования оптимальных (по степени увлажнения) условий уплотнения. Осадки находились в благоприятных условиях по последнему показателю (имели большую влажность) лишь тогда, когда они залегали близко к

дневной поверхности. Но именно в это время они испытывали влияние ничтожно малого давления. Когда же давление в результате прогрессивного накопления осадков повышалось, осадки вследствие уменьшения влажности и появления кристаллизационных и иных связей упрочнялись, превращались в породу, которая уплотнялась очень слабо. В итоге в ходе седиментации и раннего этапа субазального диагенеза сформировались недоуплотненные толщи лёссовых пород, обладающих просадочными, сингенетическими по своей природе свойствами.

Графическая модель уплотнения пылеватых эоловых осадков описанным путем и формирования из них недоуплотненных просадочных лёссовых пород, предложенная Н.Я. Денисовым, показана на рис. 15. Кривая  $a-o$  является кривой нормального уплотнения полностью водонасыщенного осадка (кривая истинного соответствия пористости давлению). Уплотнение вначале водонасыщенного,

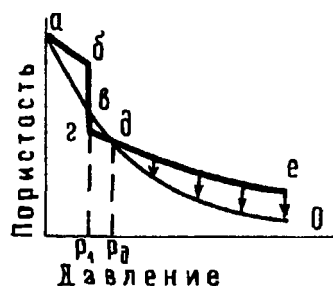


Рис. 15. Графическая модель уплотнения и формирования сингенетической просадочности эоловых лёссовых пород (по Н.Я. Денисову, 1951). Стрелками здесь и далее показана величина зоны потенциальной просадочности

затем подсыхающего осадка верхнего горизонта на первом этапе его формирования (например, первый год накопления толщи) под действием собственного веса (давления  $P_1$ ) отображается отрезком  $a-b$ . Если после этого сверху накапливается новый слой<sup>1</sup> и он полностью промачивается совместно с ранее сформировавшимися, то последний доуплотняется (отрезок  $б-в$ ). Последующее высыхание этого слоя сопровождается усадкой, которая обуславливает уменьшение пористости (отрезок  $в-г$ ; величина этого уменьшения зависит от состава грунта, и для лёссовых пород она обычно невелика). При последующем росте давления от вышележащих пород и вновь накапливающихся осадков и сохранении невысокой влажности кривая дальнейшего уплотнения  $г-д-е$  рассматриваемого элементарного слоя пород вскоре пересечет в точке  $д$  кривую нормального уплотнения  $a-o$  и пойдет выше нее. Вследствие этого в диапазоне давлений, больших  $P_д$ , порода будет недоуплотненной (см. рис. 15).

<sup>1</sup> В модели Н.Я. Денисова его накопление не учитывается, отражается лишь повторное увлажнение-дегидратация ранее сформировавшегося слоя.

При поступлении воды и сильном увлажнении пород при любом давлении в пределах данного интервала лёссовая порода будет проявлять просадочные свойства.

**Гипотеза Н.Я. Денисова о формировании сингенетической просадочности делювиальных и пролювиальных лёссовых пород.** Образование толщ пылеватых делювиальных и пролювиальных отложений, так же как и эоловых, происходит путем последовательного наслоения одних элементарных слоев на другие. Отличие заключается в двух главных особенностях: 1) при делювиальном и пролювиальном процессах формируется изначально полностью водонасыщенный пылеватый осадок; 2) мощность его слоя, накопленного за один этап осадконакопления, как правило, больше, чем у эоловых образований, и может достигать в пролювиальных шлейфах больших величин, вплоть до первых метров (Трофимов, 1990б, в).

В ходе накопления полностью увлажненных осадков рассматриваемого генезиса, их высыхания в условиях аридного климата, последующего увлажнения после перекрытия новым слоем водонасыщенных образований, их совместного высыхания происходят процессы уплотнения, очень близкие к описанным ранее для эоловых отложений. В этом случае также формируется разрыв во времени периода действия на пылеватые высохшие и уже упрочнившиеся породы возросшего давления от веса вышележащих образований и периода существования оптимальных по степени увлажнения условий их уплотнения. В итоге в ходе седиментации и раннего субаэрального литогенеза формируются недоуплотненные толщи лёссовых делювиальных или пролювиальных отложений, которым свойственна сингенетическая просадочность.

Это сходство позволило Н.Я. Денисову использовать модель, приведенную на рис. 15, для описания формирования сингенетической просадочности делювиальных и пролювиальных отложений. И это в целом верно, если рассматривать ситуацию, когда в точке *a* кривых находится изначально полностью увлажненный грунт.

Анализ гипотез Н.Я. Денисова (Трофимов, 1980) показал, что геологически слабыми ее позициями являются: а) трудности ее применения к анализу генезиса просадочности сложно построенных толщ, в частности разрезов, в которых установлена цикличность изменения состава, строения и свойств, особенно сложенных отложениями разного генезиса (включая аллювиальные, озерно-аллювиальные и другие водные) и содержащих погребенные почвы холодного или гидроморфного типов; б) отсутствие доказательств путей сохранения просадочных свойств лёссовых

пород в течение длительного (геологического) времени; в) трудности объяснения широко встречающегося резкого увеличения просадочности в лёссовой толще под горизонтом погребенных почв; г) сложность объяснения отмечаемого увеличения просадочности лёссовых пород при одинаковой их влажности в береговых или искусственных склонах по сравнению с плакорными участками; д) трудности объяснения нередко встречающегося четко выраженного скачкообразного закономерного (нестационарного) изменения величины просадочности лёссовых пород при бытовой нагрузке по разрезу — резкое уменьшение ее по глубине в однородных толщах и отложениях отдельных седиментационных циклитов в сложно построенных толщах; исходя из гипотезы Н.Я. Денисова, следовало бы ожидать сначала некоторого увеличения величины коэффициента относительной просадочности при такой нагрузке вниз по разрезу (обычно до 5—6 м, редко более — до 10—12 м), затем в разной степени выраженного закономерного уменьшения его, а затем вновь возрастания (последовательное пересечение с кривыми просадочности 0,1; 0,2; 0,3 МПа и более) или, по крайней мере, скачкообразного незакономерного (стационарного) изменения этого показателя по разрезу в верхней части толщи.

**Криосингенетическо-сублимационная гипотеза формирования просадочности лёссовых пород.** А.В. Минервиным и Н.Н. Комиссаровой в 1983 г. была выдвинута гипотеза о формировании сингенетической просадочности лёссовых пород в процессе сингенетического промерзания пылеватых осадков и последующего их обезвоживания (иссушения) путем сублимации льда или ускоренного испарения влаги при геологически быстрой дегидратации многолетней мерзлоты. Ими выдвинут “принцип криогенного разуплотнения” и составлена графическая логическая модель этого способа формирования просадочности.

А.В. Минервин (1983) подчеркивает, что при оттаивании в процессе повышения температуры первой переходит в жидкое состояние засоленная часть льда, находящаяся в порах высокопористой мерзлой породы. “Образующийся при этом электролит испаряется в условиях отрицательных температур. Таким образом, при повышении температуры происходит постепенное вытаивание льда, сопровождающееся непрерывным испарением талой влаги, что приводит к иссушению грунта еще до достижения им положительной температуры. Подобные явления обеспечивают сохранение в процессе оттаивания высокой пористости грунта, образовавшейся за счет криогенного расширения воды при промерзании глобулярной системы” (с. 28—29).



Подчеркнем, что эта гипотеза выдвинута в очень общем виде; необходимо сформулировать физические, климатические и геологические условия "работы" такого механизма формирования сингенетической просадочности лёссовых пород, причем применительно не только к элементарному слою, но и к толщам простого и сложного строения.

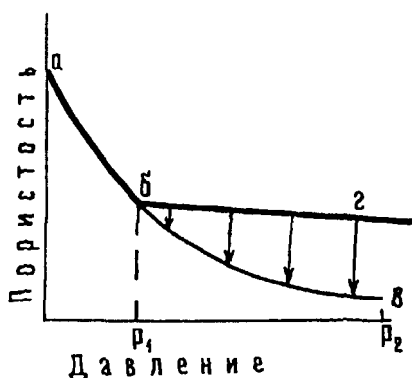
**Гипотеза Н.Я. Денисова о генезисе эпигенетической просадочности аллювиальных лёссовых пород.** Образование просадочности аллювиальных отложений идет принципиально иным путем. Если у эоловых, делювиальных и пролювиальных лёссовых пород она формируется в ходе накопления толщ на пути превращения осадка в породу, то у аллювиальных отложений возникает вследствие изменения термовлажностных условий уже после завершения их осадконакопления и превращения в высокопористую породу (преимущественно скрыто- и линзовиднослоистых микрофаций аллювия) в условиях поймы. В силу этого первые (эоловые, делювиальные и пролювиальные) в подавляющем большинстве разрезов могут проявлять просадочные свойства под действием собственного веса толщи (он может существенно возрасти в ходе продолжавшегося осадконакопления), а вторые теоретически за счет описанного далее процесса этой особенностью не обладают и могут реализовать просадочность только под дополнительной нагрузкой (Трофимов, 1986б, 1990в).

Первым рассмотрел обсуждаемый вопрос Н.Я. Денисов (1951), обосновавший возможность появления просадочности у аллювиальных пылеватых пород после перехода их из разреза поймы в обстановку надпойменной террасы в условиях жаркого климата. Им логически показаны пути образования этого свойства у таких пород как в ходе естественного геологического развития территории (увеличение внешней нагрузки за счет формирования в аридных условиях перекрывающей аллювий делювиальной, пролювиальной или другой по генезису субаэральной толщи), так и в процессе инженерно-хозяйственной деятельности человека (например, вследствие увеличения внешней нагрузки под действием возведенного сооружения).

История уплотнения аллювиальных пылеватых отложений пойменной фации представляется следующей. При накоплении пылеватых осадков в пределах поймы давление, испытываемое элементарным их слоем в связи с увеличением мощности последующих перекрывающих образований с 0 до  $h$  м, возрастает от 0 до  $P_1$ . Поскольку осадки водонасыщены (или сильно увлажнены), то их уплотнение эффективно и совпадает с кривой нормального уплотнения (отрезок  $a-b$  на рис. 16). В ходе геологического развития пойменные условия сменяются обста-

новкой надпойменной террасы, что обусловит некоторое подсыхание и упрочнение аллювиальных отложений. Если затем эти породы будут перекрыты образованиями делювиального (пролювиального) происхождения (или на ней возведут инженерное сооружение), то суммарная нагрузка на рассматриваемый слой возрастет до  $P_2$ . Под ее влиянием маловлажные упрочненные породы этого слоя начнут уп-

Рис. 16. Графическая модель уплотнения и формирования эпигенетической просадочности аллювиальных лёссовых пород (по Н.Я. Денисову, 1951)



лотняться. Их уплотнение идет по кривой  $бг$ , лежащей выше кривой нормального уплотнения (рис. 16), вследствие чего возникает эпигенетическая недоуплотненность аллювиальных пород (при этом чем больше величина дополнительной пригрузки и чем меньше влажность этих пород, тем большей будет степень такой недоуплотненности). В соответствии с этим увлажнение грунта на этом участке вызовет его доуплотнение и дополнительную осадку — просадку.

И в отношении этой гипотезы есть целый ряд геологических вопросов, требующих своего разрешения. По существу, четыре первые позиции, отмеченные выше в отношении гипотезы Н.Я. Денисова о генезисе сингенетической просадочности, правомерны и для этого случая. Однако позиция пятая — наличие четко выраженного скачкообразного закономерного уменьшения коэффициента относительной просадочности в однородных и простых по строению толщах при определенной нагрузке, превышающей бытовую, уже может быть легко объяснена. Ведь лёссовые породы верхней части разреза уплотнялись в маловлажном состоянии под влиянием природной нагрузки в существенно меньшей степени по сравнению с более глубоко залегающими, на которые длительное время действовало большее по величине давление от вышележащих пород. Поэтому при одинаковой действующей нагрузке (например, 0,3 МПа), превышающей природную, величина деформации при увлажнении у образцов, отобранных с меньших глубин, будет существенно большей, чем отобранных с больших глубин; коэффициенты относительной просадочности будут изменяться по этой же закономерности. Если же нагрузку в процессе опыта мы возьмем

равной природной на какой-то глубине, то образцы, залегающие выше ее, окажутся просадочными, причем коэффициент относительной просадочности их будет тем больший, чем с меньшей глубины образцы отобраны. Ниже этой глубины аллювиальные лёссовые породы при такой нагрузке окажутся непросадочными.

**Гипотеза гипергенно-дегидратационно-разуплотнительного механизма формирования просадочности лёссовых пород разного генезиса.** Эта гипотеза первоначально выдвинута А.В. Минервиным в 1959 г. Затем более углубленное ее изложение осуществлено А.В. Минервиным и Е.М. Сергеевым в 1961—1964 гг., а позже ряд позиций в нее внесли автор данной работы (Трофимов, 1963) и А.В. Минервин (1975).

Суть этой гипотезы: формирование просадочности лёссовых пород связано с разуплотняющим и дегидратационным воздействием гипергенных процессов на изначально пылеватые и в целом высокопористые образования<sup>1</sup>. В ее рамках ведущая роль отводится разуплотнению и дегидратации толщи вследствие изменения ее термовлажностного режима в условиях отсутствия фазовых переходов воды (вода — лед — вода) или их наличия только в современном слое сезонного промерзания.

Логико-графическая модель формирования просадочности лёссовых пород в соответствии с этой гипотезой на примере изначально пылеватых отложений водного генезиса показана на рис. 17.

На этом графике отрезок *авг* отвечает природному уплотнению породы озерно-аллювиального происхождения. Отрезок *гд* соответствует разуплотнению пород под влиянием гипергенных процессов. Его величина может быть различна, что обусловлено составом пород, местоположением их массива, климатом и глубиной развития процесса гипергенеза (см. в последующих разделах).

Одним из наиболее веских доказательств в пользу этого пути является широкое покровное залегание просадочных лёссовых пород в разрезах разных геоморфологических элементов (междуречных равнин, надпойменных террас, пролювиальных шлейфов, склонов и др.), сложенных различными по генезису породами (включая аллювиальные, озерно-аллювиальные, водноледниковые и даже ледниковые). В подавляющей части этих разрезов отмечено закономерное (часто скачкообразное) умень-

---

<sup>1</sup> Применительно к преобразованию массивов маловлажных пород целесообразно говорить о "гипергенно-разуплотнительной" ветви этой гипотезы.

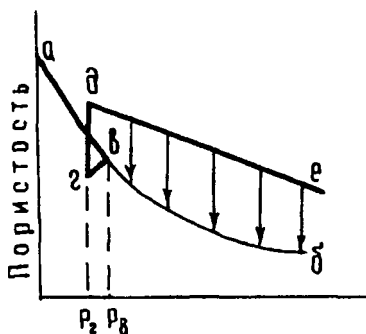


Рис. 17. Модель уплотнения-разуплотнения и формирования просадочных свойств в ходе гипергенного изменения озерно-аллювиальных отложений пылеватого состава (по В.Т. Трофимову и В.С. Бондаренко, 1983а)

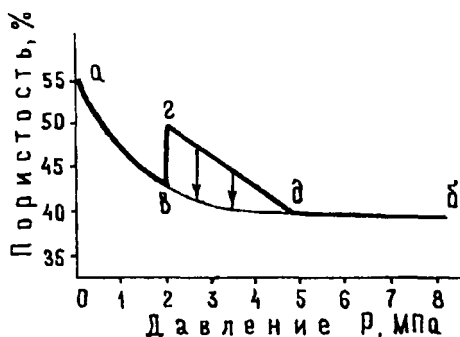


Рис. 18. Модель формирования эпигенетической просадочности лёссовых пород при их криогенном разуплотнении в ходе эпигенетического промерзания и последующем иссушении (по А.В. Минервину и Н.Н. Комиссаровой, 1983)

шение коэффициента относительной просадочности вниз по разрезу, начиная непосредственно от современных подпочвенных горизонтов, причем не только при дополнительных нагрузках (что можно объяснить исходя из построений Н.Я. Денисова), но и, главное, под нагрузкой, равной природной. Наличие лёссовых пород последнего типа, залегающих в верхней части разреза аллювиальных, озерно-аллювиальных и водно-ледниковых толщ, вообще не может быть объяснено ни одной из гипотез Н.Я. Денисова. Оно свидетельствует, что водные осадки уже после их превращения в горную породу нормальной уплотненности оказались разуплотненными по отношению к природной нагрузке. Современные условия залегания этих пород неизбежно приводят к выводу, что это разуплотнение гипергенное, а просадочность пород эпигенетическая.

Важное значение имеет и следующий момент: гипергенным разуплотнением логично объясняется развитие наиболее просадочных лёссовых пород на присклоновых участках различных геоморфологических элементов, сложенных аллювиальными и озерно-аллювиальными отложениями. Именно здесь при прочих равных условиях наиболее активно протекает дегидратация толщ, их агрегация, термическое разуплотнение, а также формируется глубокое сезонное промерзание грунтов.

Кроме того, именно с этих позиций легко объясняется увеличение просадочности под горизонтами погребенных почв. Генезис просадочности простых по строению лёссовых толщ, сложенных отложениями водного генезиса (аллювиальными, озерно-

аллювиальными, водно-ледниковыми) и проявляющих просадочность при природной нагрузке, может быть объяснен только с учетом этой гипотезы.

**Криозлювиальная гипотеза формирования просадочности лёссовых пород.** Эта гипотеза обособилась из недр предыдущей и связана прежде всего с именами А.В. Минервина, Е.М. Сергеева и их соавторов (А.М. Воронина, Н.Н. Комиссаровой, Н.Х. Тимирясовой, Д.В. Бородулиной и др.). В рамках этой гипотезы формирование просадочности связывается с воздействием криогенных процессов на выветривающиеся породы разного генезиса, возраста и состава. Особенно большая роль отводится сторонниками этой гипотезы разуплотнению пород в верхней части разреза за счет сезонного промерзания пород, циклическому изменению температур в слое годовых теплооборотов, а также сублимации льда из мерзлых толщ, что позволяет разуплотненным ранее льдистым породам сохранить высокую эпигенетическую пористость и приобретать просадочность в условиях низкой влажности при переходе температур пород в область положительных значений.

Эта гипотеза переросла, модифицировалась в построениях А.В. Минервина (1982) в **криоэпигенетическо-сублимационную гипотезу формирования просадочности лёссовых пород.** Суть ее: формирование просадочности связано с разуплотнением пород любого генезиса и возраста, приобретаемым в ходе эпигенетического промерзания, которое сохраняется при их дегидратации путем сублимации или испарения влаги при деградации мерзлоты.

А.В. Минервин и Н.Н. Комиссарова (1983) предложили графическую модель формирования эпигенетической просадочности лёссовых пород при их криогенном разуплотнении (рис. 18). В увлажненном состоянии пористость соответствует давлению вышележащих пород (отрезок *ав*). На каком-то временном отрезке существования уже сформировавшиеся породы эпигенетически промерзают, что сопровождается их криогенным разуплотнением (отрезок *вг*). Породы приобретают высокую пористость, становятся разуплотненными по отношению к действующей вертикальной нагрузке от веса пород. Если такое состояние сохранится в процессе иссушения пород (например, вследствие сублимации льда), то сформируется эпигенетическая просадочность, которая будет реализована при последующем увлажнении пород.

С двумя последними гипотезами связан целый ряд геологических вопросов и нерешенных проблем. К их числу относятся: 1) неразработанность вопроса о палеоклиматических и геологи-

ческих условиях “работы” механизма иссушения разуплотненных при эпигенетическом промерзании пылеватых мерзлых толщ путем сублимации льда или ускоренного испарения влаги при геологически быстрой деградации многолетней мерзлоты; 2) недостаточно четко сформулированные позиции в вопросах консервации и сохранения просадочных свойств во времени; 3) трудности анализа сложно построенных толщ, просадочность которых по разрезу изменяется циклически; 4) отведение слишком большой роли процессу сезонного и многолетнего промерзания-протаивания в формировании просадочных свойств пород элементарного слоя; 5) недостаточный учет других факторов гипергенного преобразования пород (изменение влажности, агрегация пород при их подсыхании, перераспределение водно-растворимых солей и карбонатов по разрезу и др.), приводящих или способствующих формированию просадочных свойств. Главным из всех этих вопросов является первый. Его решение одновременно позволяет решить, по существу, и второй и третий вопросы.

**Газогидратная гипотеза формирования просадочности лёссовых пород.** Эта гипотеза выдвинута А.А. Коноваловым в 1997 г. в связи с тем, что “возможность сублимации льда из толщи грунта в больших объемах (мощность просадочных грунтов достигает десятков метров) при наличии снегового и даже ледяного (в эпохи оледенений) покрова вызывает сомнения” и что “просадочность лёссовых грунтов (по крайней мере, не золотого происхождения) под действием собственного веса известными механизмами обезвоживания объяснить трудно”.

Суть газогидратной гипотезы формирования просадочности лёссовых пород состоит в следующем: одним из возможных механизмов образования макропористости и просадочности этих пород является образование газогидратов в приповерхностных отложениях в ледниковые периоды и их разрушение с выносом газов в атмосферу в межледниковье. В обоснование этого А.А. Коновалов приводит следующие позиции:

- 1) при образовании льдоподобных газогидратов вода увеличивается в объеме на 26—32%, развивая огромные давления (способные деформировать и даже разрывать металлические трубы);
- 2) газогидраты обладают цементирующими свойствами;
- 3) газогидраты разного состава формируются в криолитосфере на небольших глубинах даже в условиях отсутствия оледенения; в первую очередь в газогидраты переходит сероводород, затем пропан, углекислый газ и метан;

- 4) в ледниковые периоды термобарические условия газогидратообразования многократно улучшались, что сопровождалось поглощением углекислого газа из атмосферы. “В результате процессов криолитогенеза и сходных с ними процессов гидратолитогенеза здесь сформировались мерзлые и гидратоносные толщи с текстурами, подобными наблюдаемым в лёссовидных льдонасыщенных толщах в области современной вечной мерзлоты...” (Коновалов, 1997, с. 92);
- 5) при потеплении климата, в частности, в конце плейстоцена происходит оттаивание многолетнемерзлых пород и разрушение газогидратов с интенсивным истечением газов в атмосфере. При этом переходе воды из гидратной фазы в жидкую ее объем уменьшается на 26—32%. Часть газа может оставаться в защемленном состоянии.

Все это приводит к тому, что в приповерхностной части разреза после разложения газогидратов в результате потепления и улетучивания газов в атмосферу формируются талые породы, около 30% порового пространства которых лишены жидкой фазы воды. В пределах этого объема грунта не могло происходить уплотнения вследствие стабильности структурных связей, включая водонестойкие. Дальнейшее иссушение толщи идет при отсутствии значительной усадки у пылеватых пород за счет испарения. В итоге формируется толща просадочных лёссовых пород.

Итак, формулировка (выдвижение) гипотезы — определенных теоретических представлений о пути формирования просадочных свойств лёссовых пород — чрезвычайно важная, необходимая, но всего лишь первая стадия решения сложной проблемы генезиса просадочности. В дальнейшем, как подчеркивал еще Е.М. Сергеев (1976), необходимо доказать реальность предложенной гипотезы путем физического моделирования в лабораторных или природных условиях применительно к элементарному объему (слою) и толще в целом, а также геологически доказать применимость выдвинутой точки зрения к условиям данного региона (разреза). Проанализируем с этих позиций выдвинутые разными авторами гипотезы, обращая наибольшее внимание на результаты физического моделирования возникновения просадочности свойств лёссовых пород.

## ПРОСАДОЧНОСТЬ КАК СИНГЕНЕТИЧЕСКОЕ СВОЙСТВО ЛЁССОВЫХ ПОРОД — ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА

---

К настоящему времени различными авторами (см. далее) опубликованы достаточно обширные экспериментальные данные о формировании сингенетической просадочности в соответствии с механизмом, постулированным и в гипотезе Н.Я. Денисова, и в гипотезе А.В. Минервина и Н.Н. Комиссаровой. Эксперименты проводились применительно к способам накопления отложений различных генетических типов (эоловые, делювиальные, пролювиальные и др.). Большая часть данных получена в ходе физического лабораторного моделирования; подобное моделирование в условиях искусственного массива в реальной природной обстановке выполнено в меньшем объеме.

### 3.1.

#### **Экспериментальные данные о формировании сингенетической просадочности эоловых лёссовых пород в соответствии с дегидратационно-недоуплотнительной гипотезой Н.Я. Денисова**

Такие данные, полученные в процессе лабораторного физического моделирования, содержатся в работах Т.В. Андреевой, Б.Ф. Галая, О.Н. Ереминой, Н.В. Коломийцева и Н.Н. Комиссаровой, В.А. Королева, Е.Ю. Куликовой, В.Т. Трофимова. Обобщение большей части этих материалов выполнено нами (Трофимов, 1987, 1989а, 1990в), а также приведена наиболее обширная оригинальная информация в соавторстве с Е.Ю. Куликовой (Трофимов, Куликова, 1995).

Одним из первых результаты лабораторного физического моделирования образования сингенетической просадочности в усло-



виях эолового осадконакопления пылеватых отложений получил Н.В. Коломийцев (1985а, б). Для осуществления опытов этим автором были использованы образцы среднего и тяжелого лёссовидных суглинков из ательских аллювиальных пород Нижнего Поволжья. Для этих суглинков характерно весьма высокое содержание крупнопылеватых (0,01—0,05 мм) и тонкопесчанистых (0,1—0,05 мм) частиц, в сумме составляющих 80%. В ательских толщах содержится значительное количество карбонатов (7,13% в среднем и 7,75% в тяжелом суглинке) и водно-растворимых солей (плотный остаток водных вытяжек составляет 10,2 и 9,7% соответственно).

В ходе экспериментов воздушно-сухая порошкообразная масса, образованная при растирании этих пород резиновым пестиком, насыпалась сверху в пластмассовые кольца диаметром 9,7 см и высотой 3,35 см. Затем одна серия сформированных пылеватых осадков замачивалась сверху водой, причем ее количество бралось из расчета, что степень влажности отложений должна была достигать 0,8—0,9. Другая серия осадков в кольцах увлажнялась капиллярно снизу. Затем увлажненные образцы в кольцах высушивались на воздухе в соответствии со схемой Н.Я. Денисова (1953) до воздушно-сухого состояния при температуре 18—20°C, причем подсушивание осуществлялось только через верхнюю плоскость системы. В процессе увлажнения пылеватого насыпного материала из ательских суглинков отмечалось некоторое уменьшение его объема, которое затем увеличивалось в процессе сушки (деформация усадки).

В результате эксперимента были сформированы высокопористые образцы лёссового состава и состояния, проявляющие просадочные свойства. Коэффициент относительной просадочности искусственно сформированных образцов среднего лёссовидного суглинка составил при давлении 0,3 МПа 0,096—0,111, а тяжело-суглинистого состава — 0,101—0,116. При этом величина просадочности образцов, сформированных промачиванием сверху, несколько выше (0,111—0,116) по сравнению с капиллярно промоченными снизу (0,096—0,101).

Более обширные по объему и более глубокие по содержанию работы по моделированию формирования сингенетической просадочности эоловых лёссовых пород выполнил Б.Ф. Галай (1985, 1987). Исследования проводились им на образцах лёссовых пород из опорных разрезов Центрального и Восточного Предкавказья (районы городов Буденновска, Георгиевска, пос. Степного). Образцы для экспериментов были отобраны с глубин от 3 до 57,5 м.

Пылеватый материал (аналог эоловой пыли), впоследствии использованный в опытах, Б.Ф. Галай получал путем растирания

воздушно-сухих образцов лёссов и лёссовидных средних и тяжелых суглинков из указанных разрезов и последующего просеивания их через сито 0,5 мм. Необходимость последней операции Б.Ф. Галай обосновывает тем, что во время пыльных бурь максимальный размер кварцевых частиц, переносимых ветром при скорости 6—8 м/с (начало пыльных бурь), составляет 0,5—0,7 мм.

Полученную таким путем пылеватую массу насыпали в установленные на стекле кольца площадью 60 см<sup>2</sup> и высотой 2,5—3,5 см. На верхнюю поверхность сформированных таким образом образцов помещали фильтровальную бумагу и через нее увлажняли пылеватый материал до влажности верхнего предела пластичности. Подобное увлажнение моделировало действие на лёссовую пыль атмосферных осадков. После этого образцы подсушивались до воздушно-сухого состояния и вновь замачивались до влажности верхнего предела пластичности. Циклическое увлажнение-высушивание повторяли четыре раза, причем в последнем цикле искусственные образцы сушили до значений влажности, соответствующей естественной увлажненности использованных в опытах лёссовых пород ряда опорных разрезов.

Следует подчеркнуть, что высушивание образцов, сформированных в кольцах из одного и того же пылеватого лёссового материала, в одной серии опытов велось без дополнительной нагрузки на водонасыщенную пылеватую массу, а во второй — при нагрузке 0,05 МПа. Первая серия опытов моделирует физико-химические условия, происходящие в самой приповерхностной (природной) части эоловой лёссовой толщи, вторая — на глубине 2,5—3 м, что соответствует мощности промачиваемого атмосферными осадками слоя естественных лёссовых пород в теоретических построениях Н.Я. Денисова.

В процессе опытов Б.Ф. Галай было показано, что значительная усадка пылеватого искусственного осадка происходит после первого цикла его замачивания и сушки. При последующих циклах замачивания-высушивания в сформированных образцах, уже обладающих значительным структурным сцеплением, заметных изменений пористости не наблюдалось.

Пористость и просадочность искусственных образцов и естественных природных лёссов определялись по общепринятым методикам. В естественных лёссах просадочность исследовалась при значениях природного давления, действующего на них в настоящее время.

Результаты экспериментов Б.Ф. Галай, часть из которых приведена в табл. 11, свидетельствуют, что все образцы искусственно сформированных эоловых лёссовых пород, включая и образованные из проб ископаемых почв, являются высокопористыми и

Таблица 11

**Результаты моделирования сингенетической  
просадочности эоловых лёссовых пород**  
(на примере разреза у пос. Стенного, по Б.Ф. Галаю, 1985)

Серия опытов	Глубина отбора образца в разрезе, м	Название грунта по классификации Б.Ф. Галая	Влажность грунта, %	Пористость образца, %		Нагрузка, при которой определялась просадочность, МПа	Относительная просадочность образца, %	
				природного	искусственно сформированного		природного	искусственно сформированного
Подсушивание пылеватого осадка без дополнитель- ной нагрузки	3,00	лёсс	6,7	39,9	44,4	0,06	1,8	3,6
	3,75	— “ —	6,8	42,2	47,8	0,07	0,6	2,7
	4,25	— “ —	7,3	45,2	47,8	0,09	0,6	4,7
	5,25	— “ —	7,6	44,0	48,5	0,10	0,8	3,1
	8,25	— “ —	6,4	42,5	48,5	0,16	0,4	3,4
Подсушивание пылеватого осадка под нагрузкой 0,05 МПа	3,00	лёсс	6,3	43,0	42,9	0,03	6,3	7,1
	5,00	— “ —	7,4	46,0	44,0	0,03	4,7	4,0
	8,00	— “ —	7,8	44,4	47,0	0,03	1,6	2,5
	10,75	— “ —	7,2	46,6	45,3	0,03	1,2	0,2
	13,25	— “ —	7,9	44,0	43,3	0,03	1,0	2,2
	15,50	— “ —	7,6	43,0	42,5	0,03	0,3	1,7
	18,50	лёсс (ми- кулинская почва)	10,0	44,0	42,5	0,03	0,8	0,1
	22,25	лёсс	9,8	44,0	43,3	0,45	1,3	5,1
	27,50	лёсс (один- цовская почва)	8,0	41,8	44,4	0,55	0,8	0,0

просадочными в условиях природной (!) или дополнительной нагрузок. Их пористость и значения просадочности в первой серии опытов, как правило, выше, чем у соответствующих им пород естественного залегания; во второй серии значения пористости и просадочности искусственных и естественных лёссовых пород часто близки между собой, но иногда отмечаются отклонения в большую или меньшую сторону. Подобные колебания

характерны и для пылеватых образцов, приготовленных из разновозрастных погребенных почв разного возраста. В целом пористость и просадочность искусственных лёссов и лёссовидных суглинков во всех экспериментах Б.Ф. Галая получились несколько выше значений этих показателей, полученных при исследовании их природных аналогов.

В.А. Королевым и О.Н. Ереминой (1986) проведены экспериментальные исследования по моделированию сингенетической просадочности в эоловых искусственных отложениях, увлажнение которых не доходило до полного их водонасыщения. Эти авторы осуществляли свои исследования на модельных образцах, исходным материалом которых был растертый легкосуглинистый крупнопылеватый просадочный лёсс (по классификации С.С. Морозова), отобранный из опорного разреза в районе г. Запорожье на правом берегу Днепра. В гранулометрическом составе лёсса доминирует крупнопылеватая фракция (около 70%); песчаные частицы составляют всего 1%, а глинистые — 2,4%. Общая известковистость исходного образца лёсса достигает 8,7%, загипсованность составляет 0,03%, а содержание водно-растворимых солей не превышает 0,05%.

Процесс формирования искусственной структуры лёсса при моделировании осуществляется увлажнением лёссового осадка путем капиллярной подпитки водой методом влагоемких сред при заданном капиллярном давлении, а также при гидратации-дегидратации в климатической камере “Фейтрон”. В первом случае роль влагоемкой среды с определенным (известным) капиллярным давлением выполняли однородные пески с начальной влажностью 3; 5; 6; 7,5; 10; 20%. На выровненную поверхность микромассивов увлажненных песков устанавливались компрессионные кольца, в которые насыпался воздушно-сухой осадок, полученный при растирании природного лёсса; пористость осадков в кольцах изменялась от 48,5 до 63,5%. Затем каждая такая система помещалась в эксикатор на 1—2 недели, в течение которых происходило увлажнение искусственного лёссового осадка (порошка) за счет капиллярной подпитки влагой из песка до достижения выравнивания капиллярных потенциалов в песчаной и пылевой частях системы. В конце эксперимента кольца с увлажненным пылевым лёссовым осадком извлекались из эксикатора и высушивались в лабораторных условиях до воздушно-сухого состояния.

В ходе гидратации-дегидратации пылеватый лёссовый осадок превратился в связную лёссовую породу, обладающую заметной прочностью (аутогезионное сцепление составляло 0,0023—0,022 МПа). Усадка пылеватых образцов, сформированных в системе с низ-

ковлажными песками, вообще не наблюдалась. В образцах же, образованных при взаимодействии с более влагоемкими песчаными средами, отмечалась усадка весьма незначительная. Во всех модельных образцах вследствие отсутствия усадки пористость сохранилась достаточно высокой.

Один из сформированных таким образом образцов с гигроскопической влажностью подвергся испытанию на просадочность под нагрузкой 0,1 МПа. Испытание показало, что искусственный лёсс, несмотря на проявление усадки в ходе дегидратации, приобрел просадочные свойства, что проявилось в коэффициенте относительной просадочности, равном 0,15 (табл. 12).

Таблица 12

Физические и физико-механические свойства  
лёсса крупнопылеватого легкосуглинистого  
и искусственно сформированных из него образцов  
(по В.А. Королеву и О.Н. Ереминой, 1986)

Образец	Пористость начальная в осадке, %	Влажность, %	Сцепление $C \cdot 10^{-3}$ , МПа	Коэффициент относительной просадочности
Природный лёсс	49,8*	1,3	20—25	0,06—0,09
Искусственный осадок, воздушно-сухой	51,5	1,5	2,5	0,10
	63,8	1,5	0,2	0,20
Искусственный, сформированный путем капиллярной подпитки водой и последующим высушиванием	50,2	6**	11,4	0,15
Искусственный, сформированный при циклической гидратации-дегидратации	58,2	5,7	1,0	0,13
	60,0	5,7	0,6	0,13
	60,9	5,7	1,2	0,12
	61,2	5,7	3,6	0,16

\* Пористость природного грунта

\*\* Исходная влажность песка, использованного в качестве влагоемкой среды

Во второй серии экспериментов В.А. Королева и О.Н. Ереминой порошок лёссового воздушно-сухого материала засыпался в кольца компрессионного прибора, где были сформированы осадки-аналоги эоловой пыли с пористостью 45—61%. Кольца с осадком эоловой пыли помещались в климатическую камеру, в которой эти образцы в течение 30 суток подвергались циклическим воздействиям переменных температур и влажности воздуха. Каждый цикл включал гидратацию пылеватого осадка при температуре 20° и относительной влажности воздуха, равной 99—100%,

конденсацию водяного пара в образце эоловой пыли при понижении температуры в камере до  $1^{\circ}$ , дегидратацию осадка при относительной влажности 20—30%. Для каждого образца искусственной эоловой пыли было выполнено 25 циклов гидратации-дегидратации. В ходе таких опытов В.А. Королевым и О.Н. Ереминой из искусственных пылеватых осадков были получены структурированные породы, обладающие заметной, хотя и меньшей, чем в первой серии опытов, структурной прочностью; последняя определялась сцеплением от 0,0006 до 0,009 МПа. Усадка образцов при испытаниях в климатической камере не отмечалась, достаточно высокая пористость полученных пород (45—61%) сохранилась.

Компрессионные определения с замачиванием при нагрузке 0,1 МПа показали, что все искусственные воздушно-сухие образцы обладают просадочными свойствами. Величины коэффициента макропористости составили 0,29—0,39, а коэффициент относительной просадочности 0,12—0,16. Значения относительной просадочности искусственных образцов оказались значительно выше, чем у исходного природного лёсса (см. табл. 12), что связано с более высокой прочностью структурных связей, сформировавшихся в процессе естественного длительного по времени литогенеза лёссовых пород в природном разрезе.

В.А. Королёв и О.Н. Еремина объясняют возникновение структурной связности в первоначально сыпучем воздушно-сухом пылеватом осадке несколькими причинами: 1) растворением на межфазной поверхности при гидратации различных химических соединений, в том числе поликремниевых кислот, и выпадением при дегидратации тонких пленок этих веществ на контактах твердых (в основном кварц-полевошпатовых) частиц; 2) образованием глинистых “мостиков”, связывающих пылеватые частицы за счет действия молекулярных и ионно-электростатических сил, вследствие перемещения глинистых частиц в жидкой компоненте при изменении кривизны капиллярного мениска в ходе дегидратации системы и их концентрации в зоне контактов пылеватых составляющих лёссового грунта; 3) возникновением молекулярного и химического взаимодействия между частицами в точке непосредственного их контакта в условиях наличия давления от вышележащей толщи пород; 4) “слеживанием” осадка вследствие вертикального массопереноса в лёссовой толще, обусловленного многократным повторением в природных условиях колебаний в основном в вертикальном направлении потенциала влаги в зоне аэрации.

В.А. Королёв и О.Н. Еремина (1986) пришли к такому выводу: “При высыхании гидратированного пылеватого осадка силы

капиллярной связности уступают место силам молекулярной, ионно-электростатической или химической природы, а коагуляционные контакты при этом трансформируются в контакты цементационного и переходного типа... При этом просадочность лёссовой толщи, накапливаемой эоловым путем, является сингенетической, а формируемое с течением времени аутогезионное сцепление — эпигенетическим” (с. 54, 55).

К этому нами (Трофимов, 1990в) было сделано одно принципиальное замечание. Просадочность как сингенетическое свойство лёссовых пород формируется в природных условиях непосредственно в ходе накопления и раннего субаэрального диагенеза пылеватых осадков. В ходе этих процессов активно действуют многие из названных выше В.А. Королевым и О.Н. Ереминой сил и возникает сингенетическое по времени образования сцепление. В ходе развития постгенетических (аутогезионных) процессов в лёссовых породах происходит эпигенетическое изменение величины структурного сцепления. В силу этих обстоятельств сцепление лёссовых пород в толще эоловых образований является эписингенетическим или даже син-эпигенетическим.

Результаты экспериментов по моделированию формирования просадочности в изначально воздушно-сухих пылеватых осадках — аналогах отложений эолового происхождения приведены также в публикациях Н.Н. Комиссаровой и Н.В. Коломийцева (1987, 1987а). В первой серии опытов этих авторов были искусственно сформированы высокопористые (47%), пылеватые образования из растертого легкосуглинистого, крупнопылевато-тонкопесчанистого лёсса опорного разреза “Запорожье”. Эксперименты показали, что все модельные образцы обладают просадочными свойствами. В частности, образец, сформированный замачиванием искусственного пылеватого, воздушно-сухого осадка водой сверху, приобрел коэффициент относительной просадочности величиной 0,011 при давлении 0,05 МПа, 0,092 — при 0,2 МПа и 0,125 — при 0,3 МПа.

Вторая серия экспериментов была выполнена Н.Н. Комиссаровой и Н.В. Коломийцевым с использованием лёссов легкосуглинистых, тонкопесчанистых верхнеплейстоценового возраста, отобранных с трассы четвертой очереди Большого Ставропольского канала. В гранулометрическом составе лёссов содержится 37—58% тонкопесчанистых (0,1—0,05 мм) и 17—57% крупнопылеватых частиц; содержание глинистой фракции в исследованных лёссах составляет 2—9%. Лёсс растирался до состояния пылеватого материала и засыпался (при плотности рыхлого сложения в  $1,15 \text{ г/см}^3$ ) в пластмассовые кольца объемом  $280 \text{ см}^3$  на половину их высоты. Осадок сверху капельно увлажнялся до сте-

пени влажности 0,8—0,9. Затем на увлажненный осадок наносили вторую половину пылеватого материала. Его увлажнение осуществлялось за счет капиллярной подпитки из нижней, ранее водонасыщенной части образца. Далее полученный пылеватый осадок высушивался в лабораторных условиях при температуре 18—20° до воздушно-сухого состояния; полученные искусственные отложения приобретали связность.

При увлажнении-высушивании пористость исходного воздушно-сухого осадка, составлявшая в начале эксперимента 57%, сократилась до 43—46%. Искусственные лёссы в процессе сушки в целом сохранили свою монолитность. Для их микростроения характерно присутствие крупных межчастичных пор размером 32—64 мкм; средний диаметр пор составляет 30 мкм, большинство пор связано друг с другом. В целом микростроение искусственных и природных лёссов сходное, структура скелетная.

Изучение сжимаемости с замачиванием показало, что в результате моделирования сформировались просадочные искусственные грунты. Коэффициент относительной просадочности при давлении 0,1 МПа составил у пылеватых сформированных пород, содержащих 2% глинистых частиц, 0,101, а у образцов с их содержанием 9% 0,068.

Моделирование формирования сингенетической просадочности в эоловых отложениях при несколько другой методике образования пород и при влиянии различных температур в процессе дегидратации было проделано В.Т. Трофимовым, Т.Г. Алексеенко, А.О. Васильевой и Е.Ю. Куликовой (1991). Материалом для моделирования просадочных свойств в этих условиях послужили два образца верхнеплейстоценовых крупнопылеватых среднесуглинистых лёсса, отобранных в верхней предгорной ступени хр. Заилийский Алатау в районе г. Алма-Аты на глубинах 11 и 13 м. Гигроскопическая влажность первого образца составляет 2,3%, пористость — 43, влажность верхнего предела пластичности — 26,9%, число пластичности — 7,8. Во втором образце значения вышеперечисленных показателей состояния составляют соответственно 1,9, 44, 26,5% и 7,1.

Из обоих образцов природных лёссов были сформированы искусственные эоловые осадки путем растирания и последующего просеивания через сито с ячейкой размером 0,5 мм. Полученный пылеватый материал насыпался в жесткие круглые металлические коробки площадью около 400 см<sup>2</sup> слоем в 2 см высотой. Полученный осадок увлажнялся водой сверху через бумажный фильтр до влажности верхнего предела пластичности.

Затем одна коробка с влажным грунтом сушилась через верхнюю плоскость при температуре 20° в течение 4—5 дней.



Аналогичный по составу и структурным особенностям искусственный лёсс во второй коробке сушился в течение 8—12 ч при температуре 40°, затем выдерживался такое же время на воздухе при температуре 18—20°, потом производилось его прогревание до 40° в течение того же времени, вновь отложение сушилось на воздухе при температуре 20°; процесс продолжался до полного высыхания осадка. Этими опытами авторы пытались воспроизвести ход суточных колебаний температур на поверхности лёссов в аридных зонах.

После завершения первого цикла высушивания на растрескавшийся вследствие усадки первый слой наносился новый слой пылеватого осадка высотой 2 см, замачивался до влажности верхнего предела пластичности и высушивался, как в первый раз. На высушенный искусственный лёсс наносили третий слой пылеватого осадка той же мощности и вновь повторяли процесс увлажнения-высушивания по вышеописанной методике. Таким образом, были образованы четыре монолита искусственных лёссовых пород площадью 400 см<sup>2</sup> и высотой 6 см, прочных и монолитных в нижней и средней частях и растрескавшихся в верхней. В итоге один из сформированных образцов высушивался при температуре 20°, а второй — при циклическом воздействии температур 40 и 20°.

Дегидратация увлажненного пылеватого осадка (до влажности 2%) приводила образцы к усадке и образованию тонких трещин, которые разъединяли слои на крупные блоки. Несмотря на усадку, в блоках не были образованы плотные лёссовые породы: плотность их скелета достигала значений 1,40—1,47 г/см<sup>3</sup>, а пористость составляла 46—48%.

Компрессионные испытания с замачиванием свидетельствуют, что искусственные золовые лёссы приобрели свойство просадочности. Коэффициент относительной просадочности при незначительной нагрузке в 0,03 МПа достигал значений 0,02—0,06, при давлениях 0,1 и 0,3 МПа — 0,08—0,15 и 0,09—0,20 соответственно. Пористость искусственных золовых лёссов, образованных при разных режимах дегидратации, оказалась близкой между собой; несмотря на этот факт, просадочность их оказалась различной. У пород, сформированных из лёссового материала первого и второго образцов, просадочность оказалась в два раза выше в серии компрессионных испытаний, в которых высушивание проводилось при циклическом изменении температур в 40 и 20°.

Автором данной работы с соавтором Е.Ю. Куликовой (Трофимов, Куликова, 1995) опубликованы результаты нового цикла экспериментальных лабораторных работ, при которых исследовалось влияние на величину формирующейся просадочности дисперсности осадка элементарного слоя и его мощности, накопи-

вающейся за один цикл осадконакопления, а также температурных условий на поверхности этого слоя и количества циклов увлажнения-дегидратации формирующего его осадка — слабой породы. Образцы для исследований отобраны в Краснодарском крае близ г. Усть-Лабинск в пределах водораздельного плато, в разрезе которого Ю.Н. Нетребко и В.П. Ударцев выделили 14 циклитов лёссовых пород (каждый из которых венчается погребенной, а верхний — современной почвой) общей мощностью 56,5 м (разрез “Кубань”). Для физического моделирования опробовались лишь верхние 14 м разреза, сложенные эоловыми верхнечетвертичными голоценовыми отложениями.

По гранулометрическому составу отобранные для экспериментов 12 образцов представлены супесями, суглинками легкими, средними и тяжелыми. Все они содержат значительное количество тонкопесчаных (8—69%), крупнопылеватых (7—21%) и в целом пылеватых (14—64%) частиц (табл. 13). В природной обстановке тонкопылеватые (0,005—0,001 мм) и глинистые (< 0,001 мм) частицы агрегированы; при микроагрегатном анализе выход первых составляет 1,5—6,7, вторых — 0,3—7,5% (для глинистых частиц чаще 1—3%). За счет агрегации этих частиц обычно возрастает содержание крупнопылеватых микроагрегатов, а в верхней части разреза — и тонкопесчаных.

Все образцы имеют щелочную реакцию — рН 7,96—8,17. Содержание легко- и средневодно-растворимых солей не превышает 0,25% (т.е. все породы относятся к незасоленным), при этом общее количество легкорастворимых солей составляет 0,07—0,09, а гипса — 0,11—0,17%. В водной вытяжке среди катионов преобладают кальций, магний и натрий + калий, среди анионов —  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ . Содержание карбонатов изменяется от 2,9 до 12,6%; преобладают карбонаты кальция (2—8%), наиболее низкое (2—3%) их содержание отмечено в верхних 1,5 м разреза.

Естественная влажность образцов колебалась от 7 до 18%, причем ниже 10 м она составляла 14—16%. Влажность верхнего предела пластичности 29—32, нижнего — 20—23%, число пластичности 5—6 у супесей, 8—10 у суглинков.

Пористость пород в верхней 5-метровой части разреза обычно равна или немногим более 50%, ниже она изменяется от 45 до 50%. Все породы просадочные. При природной нагрузке относительная просадочность составляет 0,03—0,04. Начальное давление просадочности небольшое и колеблется в пределах 0,020—0,050 МПа.

В процессе экспериментов формировали искусственный аналог эолового осадка элементарного слоя различной мощности, его увлажняли и высушивали при разных режимах, а затем определя-

Таблица 13

## Гранулометрический состав эловых лесовых пород, использованных при моделировании

Номер образца	Глубина отбора, м	Содержание частиц по фракциям (диаметр в мм), %								Название грунта по классификации Н.А. Качинского
		> 0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001	
1	0,5–0,8	0,1	0,2	1,2	11	34	12	18	23	суглинок легкий
2	1,6–2,4	0,1	0,1	3,8	35	27	6	13	15	суглинок средний
3	2,4–3,4	0,1	0,1	2,8	12	34	11	17	23	суглинок тяжелый
4	3,4–4,0	0,1	0,1	1,8	15	26	18	16	23	– “ –
5	4,2–4,8	0,1	0,1	0,8	20	22	9	19	27	– “ –
6	5,4–6,2	0,1	0,1	11,8	68	8	–	6	6	супесь
7	6,6–7,3	59,4	4,2	3,4	8	7	2	8	8	– “ –
8	7,9–8,6	0,3	0,3	10,4	48	21	4	8	8	суглинок легкий
9	9,3–9,9	0,4	0,1	3,5	64	13	3	8	8	супесь
10	9,9–10,5	0,4	0,7	6,9	30	24	8	12	18	суглинок средний
11	12,4–13,2	0,1	0,2	6,7	69	10	4	2	8	супесь
12	13,2–13,4	0,3	0,1	3,6	53	27	3	6	7	– “ –

Примечание. Анализ проведен пипеточным методом, подготовка к анализу — растирание с перфосифатом натрия. По классификации С.С. Морозов образцам 1-12 соответствуют следующие названия грунтов: 1-3, 5, 10 — суглинок средний лесоводный; 4 — суглинок тяжелый лесоводный; 6, 11 — супесь лесоводная; 7-9, 12 — песок обобщенный.

ли просадочность при различных нагрузках. Пылеватый материал для создания указанного слоя получен путем растирания образцов природных лёссовых грунтов в воздушно-сухом состоянии и последующего просеивания через сито с ячейкой 0,5 мм.

Формирование искусственного эолового осадка, его увлажнение-высушивание и превращение в слабую лёссовую просадочную породу проводили по следующей методике. Пылеватый материал в воздушно-сухом состоянии высыпали слоем определенной мощности (от 0,5 до 3 см) в жесткие круглые металлические коробки<sup>1</sup> площадью около 400 см<sup>2</sup>. Этот осадок во всех случаях стандартно увлажняли дистиллированной водой сверху через бумажный фильтр до влажности верхнего предела пластичности (или несколько большей, соответствующей полному его водонасыщению). После этого большую часть образцов подсушивали в течение 4—5 суток до воздушно-сухого состояния на воздухе при температуре 20°. Меньшую часть образцов подсушивали в течение 8—12 ч при температуре 40°, а затем в оставшуюся часть суток выдерживали при температуре 20° (далее этот режим обозначен как 40/20°); такой цикл повторяли до приобретения образцом воздушно-сухого состояния.

Для определения просадочных свойств формировали “микромассивы” высотой не менее 3 см. Поэтому при мощности элементарного слоя осадка, накапливаемого за один этап искусственного осадконакопления, меньше этой контрольной величины, на поверхность первого высохшего после увлажнения слоя пылеватого образца насыпали второй слой воздушно-сухого пылеватого материала той же мощности. Его увлажняли, как и в первом случае; при этом нижележащий ранее высохший слой также промачивался, затем вновь повторяли процесс высушивания до воздушно-сухого состояния. В итоге в ходе каждого эксперимента образовывался “микромассив” лёссовых пород площадью около 400 см<sup>2</sup> и высотой 3 см, из которого грунт вырезали в кольца компрессионного прибора ЦНИИ МПС и определяли просадочность при нагрузках 0,05, 0,1 и 0,3 МПа.

В процессе дегидратации до воздушно-сухого состояния увлажненный пылеватый осадок давал усадку, часто растрескивался. При накоплении вышележащего слоя возникшие трещины заполнялись пылеватым материалом. Несмотря на это, в процессе экспериментов не сформировались плотные грунты. Их порис-

---

<sup>1</sup> В ряде экспериментов на дно этих коробок помещали кольца компрессионных приборов площадью 40 см<sup>2</sup>, и формирование пробы шло непосредственно в них. Осадок при этом наносили так же, как и при отсутствии колец, — по всей площади коробки.

тость у подавляющего числа искусственных образцов составляла 42—45% (при крайних значениях 39—48%).

В первой серии экспериментов, основной задачей которых было установить принципиальную возможность образования вышеописанным способом просадочного грунта из выбранных и охарактеризованных ранее пород, за один этап “осадконакопления” насыпали слой осадка мощностью 3 см, его увлажняли и подсушивали также только один раз (один цикл увлажнения-дегидратации). В ходе дегидратации при влажностях, близких к 15, 10 и 5% (каждый раз контролируемых для конкретной пробы), из сформированных образцов вырезали по три пробы (при каждом указанном значении влажности) в кольца компрессионного прибора и определяли просадочность при нагрузках 0,05, 0,1 и 0,3 МПа соответственно. В итоге получили положительный ответ на поставленную задачу и зависимость величины образующейся просадочности от влажности при разных действующих давлениях.

Во второй серии экспериментов изучали влияние гранулометрического состава осадка на величину формирующейся просадочности. Из всех грунтов за один этап сформировали однотипные по форме и объему образцы высотой 3 см; насыпали слой осадка мощностью 3 см, его подвергали одному циклу увлажнения-дегидратации<sup>1</sup>. Из высохших до воздушно-сухого состояния (их влажность составила 1—2%) образцов вырезали пробы в компрессионные кольца и определяли просадочность при таких же нагрузках, как и в первой серии опытов.

В основную задачу экспериментов третьей серии входило изучение влияния мощности осадка, накопленного за один этап осадконакопления, на величину формирующейся просадочности. С этой целью из пылеватого материала для каждого грунта данной выборки готовили три образца стандартного размера по площади: для одного образца мощность элементарного слоя принимали равной 3 см, для другого — 1 см и для третьего — 0,5 см. Иначе говоря, искусственный образец с заданной высотой формировали в первом случае за один этап накопления и один цикл увлажнения-дегидратации микромассива, во втором — за три, а в третьем — за шесть<sup>2</sup>. Дальнейшее определение просадочности проводили по той же методике.

---

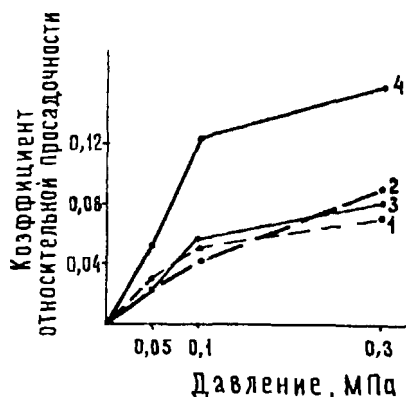
<sup>1</sup> Подчеркнем, что зависимость формирующейся просадочности от гранулометрического состава можно получить и по результатам всех других серий экспериментов. Однако во второй серии опытов она проявляется в наиболее чистом виде, поскольку влияние других факторов (влажности, мощности элементарного слоя осадка, числа циклов увлажнения-дегидратации и др.) отсутствует.

<sup>2</sup> Из этого следует, что на результатах сказывается не только изучаемый в этой серии экспериментов фактор, но и число циклов увлажнения-дегидратации пылеватого осадка — грунта.

В четвертой серии экспериментов исследовали влияние количества циклов увлажнения-дегидратации осадка — слабой породы на величину формирующейся просадочности. С этой целью из пылеватого материала для каждого отобранного образца готовили три осадка мощностью 3 см каждый. Первый из них испытывал один цикл увлажнения-дегидратации, второй — три, а третий — шесть циклов. Определение просадочности проводили, как и в предыдущих случаях.

В последней (пятой) серии экспериментов изучали влияние температуры на поверхности образцов на величину формирующейся просадочности. С этой целью в жесткие формы насыпали слои осадка высотой 3 см, часть которых после стандартного увлажнения высушивали при температуре 20°, а часть — при температуре 40/20°. По достижении ими воздушно-сухого состояния определяли просадочность при нагрузках 0,05, 0,1 и 0,3 МПа.

Рис. 19. Зависимость величины относительной просадочности искусственно сформированных образцов — аналогов эоловых лёссовых отложений разного гранулометрического состава в воздушно-сухом состоянии от величины давления (по В.Т. Трофимову и Е.Ю. Куликовой, 1995). Мощность слоя осадка, формируемого за один этап, 3 см, один цикл увлажнения-дегидратации; температура на его поверхности при дегидратации 20°; дополнительной нагрузки нет.



Графики зависимости построены для образцов с максимальными значениями относительной просадочности при нагрузке 0,3 МПа 1 — суглинок тяжелый (образец 1), 2 — суглинок средний (образец 2), 3 — суглинок средний (образец 8), 4 — супесь (образец 11)

Данные, полученные в ходе экспериментов, приведены в табл. 14—17) часть из них графически представлена на рис. 19—24.

При изучении принципиальной возможности сформировать просадочность у искусственных образцов, созданных по принятой методике (опыты первой серии), был получен положительный результат. Все семь искусственных образцов, по составу являющихся супесями, суглинками легкими, средними и тяжелыми, оказались просадочными при нагрузках 0,1 и 0,3 МПа и влажности 15% и менее, а часть из них — и при нагрузке 0,05 МПа (табл. 14). Зависимость величины просадочности, сформировавшейся при дегидратации осадка,

Таблица 14

**Результаты определения просадочности  
искусственно сформированных образцов аналогов  
золотых лёссовых пород, подсушенных при температуре 20°  
в ходе одного цикла увлажнения-дегидратации до разной влажности  
(мощность слоя осадка, формируемого за один этап, 3 см;  
дополнительной нагрузки нет)**

Номер образца	Влажность образца, %	Коэффициент относительной просадочности при давлении, МПа		
		0,05	0,1	0,3
1	15	0,008	0,020	—
	10	0,014	0,052	0,060
	4	0,070	0,078	0,100
2	14	0,0	0,010	0,012
	11	0,012	0,030	0,030
	5	0,024	0,032	0,068
3	15	0,0	0,015	0,021
	10	—	0,044	0,087
	5	0,050	0,064	0,091
5	13	0,009	0,021	0,020
	9	0,015	0,095	0,142
	6	0,020	0,073	0,143
7	13	0,0	0,0	0,0
	10	0,0	0,018	0,030
	3	0,016	0,020	0,022
8	16	0,0	0,008	0,010
	11	0,010	0,020	0,008
	7	0,021	0,030	0,055
12	16	0,0	0,0	0,0
	10	0,0	0,008	0,025
	5	0,015	0,017	0,050

*Примечание.* Здесь и в табл. 15—17 номера образцов соответствуют их номерам в табл. 13

от действующего при замачивании давления и влажности в целом аналогична ранее приведенным.

Зависимость просадочности искусственно сформированных образцов от их гранулометрического состава (вторая серия экспериментов) проявилась очень четко (см. табл. 15, рис. 19 и 20). Эти данные получены экспериментально впервые. Они свидетельствуют, что в данной выбор-

Таблица 15

Результаты определения просадочности  
искусственно сформированных образцов — аналогов золых лёссовых пород  
с разным гранулометрическим составом и неодинаковой мощностью слоя,  
накапливаемого за один этап, образцы подсушены до воздушно-сухого состояния  
при температуре 20°, дополнительной нагрузки нет

Номер образца	Название грунта	Мощность накопленного за один этап слоя, см	Плотность скелета грунта, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Коэффициент относительной просадочности при давлении, МПа		
					0,05	0,1	0,3
1	2	3	4	5	6	7	8
1	суглинок тяжелый	3	1,44	47,0	0,051	0,121	0,115
		1	1,50	44,8	0,030	0,072	0,112
		0,5	1,57	42,3	0,009	0,015	0,025
2	суглинок средний	3	1,52	44,1	0,020	0,041	0,089
		1	1,46	46,3	0,040	0,075	0,091
		0,5	1,54	43,7	0,029	0,064	0,098
3	суглинок тяжелый	3	1,49	45,6	0,051	0,072	0,141
		1	1,58	42,3	0,020	0,031	0,052
		0,5	1,57	42,7	0,008	0,022	0,072
4	— " —	3	1,47	46,1	0,031	0,074	0,108
		1	1,55	43,2	0,020	0,048	0,085
		0,5	1,58	42,1	0,025	0,038	0,070
5	— " —	3	1,54	43,8	0,052	0,060	0,120
		1	1,58	42,3	0,025	0,048	0,083
		0,5	1,60	41,6	0,019	0,046	0,100



1	2	3	4	5	6	7	8
6	сушь	3	1,61	40,8	0,024	0,032	0,050
		1	1,59	41,5	—	0,035	0,064
		0,5	1,59	41,5	0,015	0,023	0,052
7	— « —	3	1,64	39,2	0,031	0,030	0,069
		1	—	—	0,024	0,055	—
		0,5	1,64	39,2	0,024	0,051	0,083
8	сушинок легкий	3	1,53	44,2	0,021	0,054	0,080
		1	—	—	—	—	—
		0,5	1,52	44,5	0,026	0,060	0,085
9	сушь	3	1,48	45,6	0,030	0,039	0,068
		1	1,52	44,1	0,035	0,035	0,053
		0,5	1,50	45,5	0,010	0,042	0,069
10	сушинок средний	3	1,51	45,2	0,028	0,042	0,076
		1	—	—	—	—	—
		0,5	1,51	45,2	0,020	0,051	0,069
11	сушь	3	1,49	44,8	0,029	0,052	0,072
		1	1,61	40,3	0,011	0,018	0,053
		0,5	1,51	44,1	0,017	0,035	0,064
12	— « —	3	1,51	43,8	0,017	0,048	0,063
		1	—	—	—	—	—
		0,5	1,54	42,7	0,033	0,040	0,064

\* Для каждого образца при мощности слоя 3 ок. осуществлены две или три указанные дегидратации (второй серии экспериментов), а при мощности слоя в 1 и 0,5 ок. — 3 и 6 циклов соответственно (третья серия экспериментов)

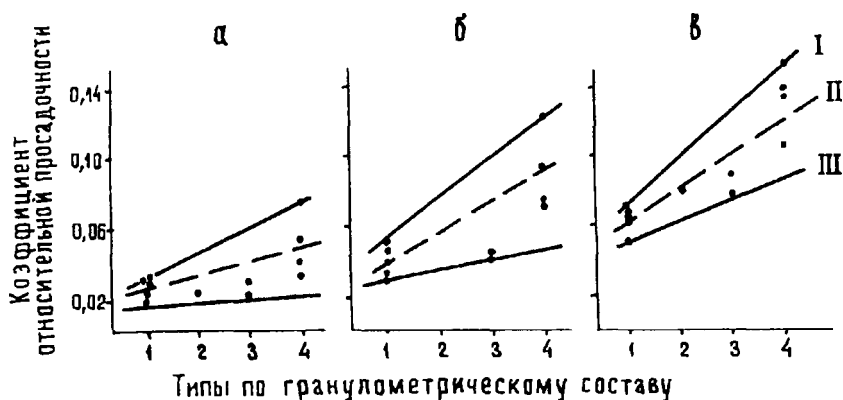


Рис. 20. Зависимость величины относительной просадочности искусственно сформированных образцов—аналогов золовых лессовых отложений (в воздушно-сухом состоянии) от их гранулометрического состава при давлениях 0,05 (а), 0,1 (б) и 0,3 МПа (в) (по В.Т. Трофимову и Е.Ю. Куликовой, 1995). Мощность слоя осадка, формируемого за один этап, 3 см, один цикл увлажнения-дегидратации; температура на поверхности образцов при дегидратации 20°, дополнительной нагрузки нет:

1 — супесь, 2 — суглинок легкий, 3 — суглинок средний, 4 — суглинок тяжелый, I — линия по максимальным значениям, II — по средним, III — по минимальным

ке образцов величина просадочности, формируемой при дегидратации осадка, возрастает от супесчаных по составу образцов к тяжелосуглинистым. Эта зависимость четко проявляется при всех действующих при определении просадочности давлениях, однако ее контрастность увеличивается по мере возрастания нагрузок (см. рис. 20). Результат оказался несколько неожиданным.

Предполагалось (на основе фактических данных по просадочности природных образований разного генезиса), что наиболее просадочными среди искусственно сформированных образцов — аналогов золовых лёссовых отложений будут легко- и среднесуглинистые разности. Однако этого не получилось ни при одной действующей нагрузке, что, видимо, скорее всего связано с очень высокой степенью агрегированности исходного пылеватого материала (см. ранее), взятого для формирования образцов, что обусловлено высоким содержанием карбонатов и преобладанием двухвалентных катионов в обменном комплексе. Именно благодаря этому прочные глобулярные микроагрегаты пылевой размерности образуют высокопористое специфически лёссовое микростроение с фазовыми контактами между глобулами; контакты возникают в ходе дегидратации осадка.

Экспериментально установленное явление поможет объяснить наличие лёссовых пород тяжелосуглинистого состава с высокой



Рис. 21. Зависимость величины относительной просадочности искусственно сформированных образцов в воздушно-сухом состоянии от их гранулометрического состава. Условные обозначения те же, что и для рис. 20, исключение — мощность слоя осадка, формируемого за один этап, 1 см (по В.Т. Трофимову и Е.Ю. Куликовой, 1995)

просадочностью и просадочных пород, которые по гранулометрическому составу отвечают легким глинам в природных условиях. В то же время, учитывая ограниченность экспериментальной выборки (двенадцать образцов, очень сходных по химико-минеральному составу, и малое число легко- и среднесуглинистых разновидностей), следует продолжить подобные экспериментальные исследования.

Выше отмечалось, что зависимость формирующейся просадочности от гранулометрического состава проявилась и по данным других экспериментов. В частности, она хорошо фиксируется по материалам опытов, в ходе которых за один этап накапливался слой осадка мощностью 1 см (см. рис. 21). Однако при формировании осадков, когда за один этап формировался слой мощности 0,5 см, эта зависимость проявилась менее рельефно (угол наклона осредняющей для всей выборки прямой имеет меньший наклон, а при нагрузке 0,05 МПа осредняющая практически горизонтальна). Это обусловлено неодинаковой (по сравнению с гранулометрическим составом) направленностью влияния других факторов (мощности осадка, накопленного за один этап; количества циклов увлажнения-дегидратации), которые одновременно влияли на формирование просадочности в ходе этих экспериментов.

Влияние мощности осадка, накапливающегося за один этап осадконакопления, на величину формируемой просадочности изучалось в третьей серии экспериментов (см. табл. 15, рис. 22). Эксперимен-

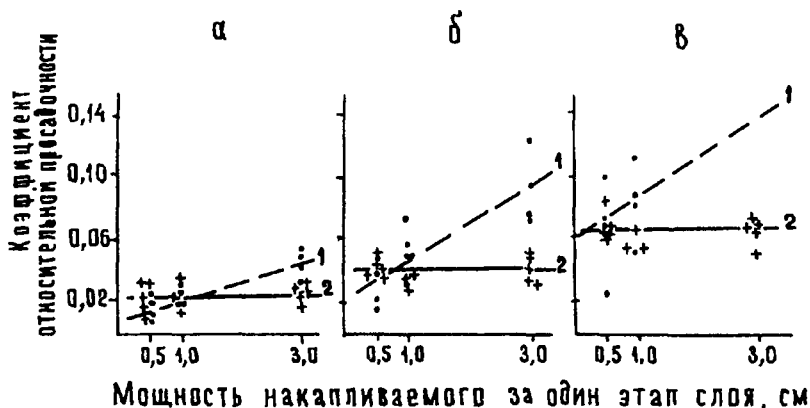


Рис. 22. Зависимость величины относительной просадочности искусственно сформированных образцов—аналогов золовых лёссовых отложений в воздушно-сухом состоянии от мощности накапливаемого за один этап слоя при давлениях 0,05 (а), 0,1 (б) и 0,3 МПа (в). Температура на поверхности образцов в процессе увлажнения-дегидратации 20°; дополнительной нагрузки нет; 1 — суглинок тяжелый; 2 — супесь (по В.Т. Трофимову и Е.Ю. Куликовой, 1995)

тальные данные свидетельствуют, что этот фактор по-разному влияет на формирование просадочности у осадков с различным гранулометрическим составом. По данным использованной при физическом моделировании выборки образцов, в этом плане четко обособлены две группы образцов, в первую из них входят супеси, а во вторую — суглинки тяжелые.

Для искусственных образцов, созданных из пылеватого материала тяжелосуглинистого состава, по мере увеличения мощности слоя, образующегося за один этап накопления воздушно-сухого осадка, формируется более высокая просадочность. Эта закономерность отчетливо проявляется при разных значениях давления, действующего при определении просадочности, как для всей выборки в целом (см. рис. 22), так и для большинства конкретных образцов (см. табл. 15).

Для образцов супесчаного состава наблюдается совершенно иная картина: величина формирующейся просадочности практически не зависит от мощности слоя осадка, накопившегося за один этап (см. рис. 22). У конкретных образцов, созданных в процессе экспериментов, какой-либо устойчивой тенденции в рассматриваемой зависимости не наблюдается, отмечаются разнонаправленные отклонения, хотя и небольшие по амплитуде (см. табл. 15).

Подчеркнем, что влияние мощности слоя осадка, накопленного за один этап, на величину формируемой просадочности прояв-

Таблица 16

## Результаты определения просадочности

искусственно сформированных образцов — аналогов эоловых лесовых пород,

испытанных несколько циклов увлажнения-десублимации,

подверженных до воздушно-сухого состояния при температуре 20°

(дополнительной нагрузки нет,

мощность слоя осадка, накопленного за один этап, 3 см)

Номер образца	Название образца	Число циклов увлажнения- десублимации	Плотность скелета грунта, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Коэффициент относительной просадочности при давлении, МПа		
					0,05	0,1	0,3
1	2	3	4	5	6	7	8
1	сушинок	1	1,44	47,0	0,051	0,121	0,155
	тяжелый	3	1,46	45,6	0,050	0,130	0,161
		6	—	—	0,064	0,145	0,160
2	сушинок	1	1,52	44,1	0,020	0,041	0,089
	средний	3	1,48	45,5	0,030	0,061	0,095
		6	—	—	0,038	0,069	0,100
3	сушинок	1	1,49	45,4	0,051	0,072	0,141
	тяжелый	3	1,58	42,3	0,019	0,051	0,122
		6	1,50	45,2	0,049	0,082	0,145
4	— <sup>11</sup>	1	1,47	46,1	0,031	0,074	0,108
		3	1,54	43,6	0,019	0,070	0,118
		6	—	—	0,040	0,081	0,095

1	2	3	4	5	6	7	8
5	супинок тяжелый	1	1,54	43,8	0,052	0,060	0,120
		3	1,51	44,9	0,034	0,078	0,140
		6	—	—	0,061	0,084	0,170
6	супесь	1	1,61	40,8	0,024	0,032	0,050
		3	1,59	41,5	0,015	0,023	0,052
		6	—	—	0,010	0,025	0,040
9	— " —	1	1,48	45,6	0,030	0,039	0,068
		3	1,57	42,3	0,030	0,036	0,051
		6	1,55	43,0	—	0,035	—
10	супинок средний	1	1,51	45,2	0,028	0,042	0,076
		3	1,47	46,3	0,045	0,050	0,089
		6	—	—	—	0,068	—
11	супесь	1	1,49	44,8	0,029	0,052	0,072
		3	1,57	41,8	0,040	0,045	0,067
		6	—	—	0,022	0,035	0,065
12	— " —	1	1,51	43,8	0,017	0,048	0,063
		3	1,56	42,0	0,018	0,033	0,071
		6	—	—	—	0,030	—



Рис. 23. Зависимость величины относительной просадочности воздушно-сухих искусственно сформированных образцов—аналогов золовых лёссовых отложений от количества циклов увлажнения-дегидратации при давлениях 0,05 (а), 0,1 (б) и 0,3 МПа (в). Мощность слоя осадка, формируемого за один этап, 3 см; температура на его поверхности 20°; дополнительной нагрузки нет; 1 — суглинок тяжелый; 2 — суглинок средний; 3 — супесь (по В.Т. Трофимову и Е.Ю. Куликовой, 1995)

ляется в этой серии экспериментов не совсем в “чистом” виде. Выше отмечалось, что микромассивы, которые образуются при формировании искусственных образцов заданной высоты из воздушно-сухих осадков разной мощности, подвергали разному числу циклов увлажнения-дегидратации, что, как известно, влияет на формирование просадочности.

Новые интересные данные получены о влиянии количества циклов увлажнения-дегидратации искусственного осадка — слабой породы на величину формирующейся просадочности (эксперименты четвертой серии). Результаты экспериментов свидетельствуют, что значение этого фактора для суглинистых и супесчаных грунтов неодинаково (см. табл. 16, рис. 23).

По данным исследований установлено, что при прочих равных условиях у суглинистых разностей величина формируемой просадочности возрастает по мере увеличения количества циклов увлажнения-дегидратации осадка — слабой породы (см. рис. 23). Эти данные согласуются с материалами (Комиссарова, Коломийцев, 1987а; Осипов, 1985), которые также получены при моделировании с суглинистыми по составу образцами.

Рассматриваемая зависимость для супесчаных разностей имеет иной характер. Первые полученные нами данные свидетельствуют об уменьшении величины просадочности у искусственно сформированных образцов при многократном увлажнении. Эта тен-

Таблица 17

Результаты определения просадочности  
искусственно сформированных образцов — аналогов золых лёссовых отложений,  
подсушенных до воздушно-сухого состояния при разной температуре  
на их поверхности и отсутствии дополнительной нагрузки  
(мощность слоя, накопленного за один этап, 3 см,  
один цикл увлажнения-дегидратации)

Номер образца	Название образца	Температура на поверхности образца, °С	Плотность скелета грунта, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Коэффициент относительной просадочности при давлении, МПа		
					0,05	0,1	0,3
2	суглинок средний	20	1,52	44,1	0,020	0,041	0,089
		40/20	1,41	47,4	0,050	0,063	0,113
6	суглесь	20	1,61	40,8	0,024	0,032	0,050
		40/20	1,42	47,8	0,034	0,064	0,075
7	— " —	20	1,64	39,2	0,031	0,030	0,069
		40/20	1,50	44,4	0,040	0,058	0,081
9	— " —	20	1,48	45,6	0,030	0,039	0,068
		40/20	—	—	0,034	0,050	—
10	суглинок средний	20	1,51	45,2	0,028	0,042	0,076
		40/20	—	—	0,050	0,055	0,090



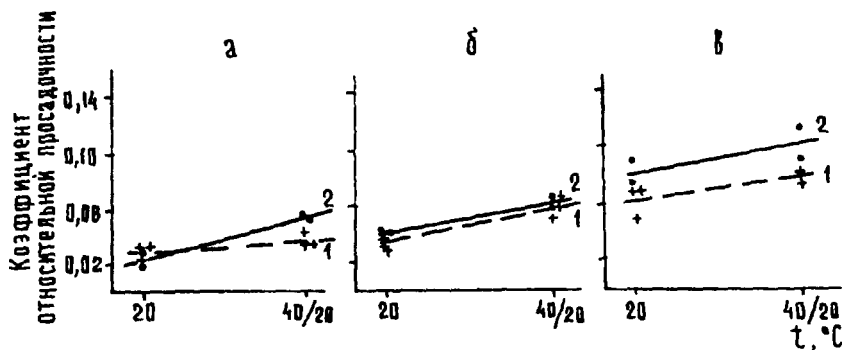


Рис. 24. Зависимость величины относительной просадочности воздушно-сухих искусственно сформированных образцов—аналогов эоловых лёссовых отложений от температуры их поверхности при давлениях: а — 0,05, б — 0,1 и в — 0,3 МПа соответственно. Мощность слоя осадка, накапливаемого за один этап, 3 см, один цикл увлажнения-дегидратации; дополнительные нагрузки нет; 1 — супесь; 2 — суглинок средний (по В.Т. Трофимову и Е.Ю. Куликовой, 1995)

денция отчетливо выражена для большинства конкретных образцов (см. рис. 23).

Отметим, что это уже второй (первый — мощность слоя, накапливаемого за один этап) из изученных нами факторов, влияние которых по-разному проявляется для супесчаных и суглинистых грунтов. Эти различия установлены экспериментально впервые по небольшой выборке образцов и требуют дальнейшего изучения.

Влияние температуры на поверхности образца при его дегидратации на величину формирующейся просадочности (опыты последней серии) проявилось достаточно отчетливо (см. табл. 17, рис. 24). Во всех случаях у искусственно сформированных образцов просадочность оказалась выше в тех опытах, в которых дегидратацию ранее увлажненного осадка проводили при более высокой температуре (точнее, при циклическом воздействии температур 40 и 20°). Эти данные хорошо согласуются с первыми опубликованными экспериментальными материалами по этой же теме (Трофимов и др., 1991). Несмотря на то что искусственные образцы — аналоги эоловых лёссовых отложений формировались по несколько отличной методике, влияние температуры на поверхности образца на величину формирующейся сингенетической просадочности оказалось в обоих случаях идентичным. Эти данные полностью согласуются и с материалами экспериментальных работ по изучению влияния температурных условий дегидратации толщи на формирование эпигенетической просадочности пылеватых аллювиальных отложений (Трофимов, Ершова, 1991).

Интересные данные в обсуждаемом направлении были получены Т.В. Андреевой (1996а, 1997). Ею для проведения лабораторного моделирования были использованы и образцы лёссовых пород эолового генезиса, отобранные в хорошо изученных опорных разрезах в районах городов Буденновска и Волгодонска и с. Отказного с глубины от 2 до 15 м. По гранулометрическому составу использованные в процессе эксперимента образцы представлены суглинками легкими (образец 1), средними (образцы 2 и 3) и тяжелыми (образец 4) по классификации Н.А. Качинского. В грунтах отсутствуют частицы крупнее 0,5 мм, крупнопылеватая фракция составляет 34—40%; содержание глинистой фракции от 13 до 36%, частицы агрегированы, их выход в микроагрегатном анализе составляет 1—10%. Преобладающие фракции 0,1—0,05 (от 3 до 43%) и 0,05—0,01 мм (от 32 до 40%).

Образцы характеризуются щелочной реакцией: рН 7,6—9,2. Образцы 2 и 3 имеют сульфатный тип засоления, величина плотного остатка 0,89—0,45% соответственно. Образец 4 не засолен, величина плотного остатка 0,27%. Содержание гипса изменяется от 1,05 до 3,7%, карбонатов — от 6,4 до 9,5%.

В минеральном составе преобладают кварц и плагиоклазы, их суммарное содержание меняется от 63,5 до 80%. Глинистая фракция представлена хлоритом, иллитом, смектитом и каолинитом.

Естественная влажность образцов колебалась от 4 до 10%. Влажность верхнего предела пластичности составляет 22—31%, нижнего 16—21%, число пластичности 6—10%. Пористость пород изменяется от 39 до 47%. Породы в ненарушенном сложении просадочные. Величина относительной просадочности при давлении 0,05 МПа составляет 0,1—7%, при 0,1 МПа — 1,5—12, при 0,3 МПа — 11—14%.

Для возможности сопоставления результатов эксперимента с данными, полученными другими исследователями, Т.В. Андреевой (1995) была выбрана методика, принятая В.Т. Трофимовым и Е.Ю. Куликовой (1995).

При моделировании пылеватый материал (аналог эоловой пыли) получали путем растирания воздушно-сухих образцов лёссовых пород и последующего просеивания их через сито 0,5 мм. Полученную пылеватую массу насыпали слоем определенной мощности в установленные на оргстекле кольца диаметром 10 см и высотой 3 см. Пылеватый материал увлажнялся дистиллированной водой через фильтровальную бумагу до верхнего предела пластичности. Затем образцы просушивались при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния (влажность 2—3%). Контроль плотности образцов производился путем взвешивания колец с грунтом.

В ходе эксперимента выяснилась принципиальная возможность формирования высокопористых недоуплотненных пылеватых пород за счет переменного увлажнения-высушивания; кроме того, ставилась задача выявления зависимости величины относительной просадочности от: а) гранулометрического состава осадка; б) мощности элементарного слоя и характера замачивания; в) количества циклов замачивания-высушивания.

Для выяснения зависимости относительной просадочности от мощности элементарного слоя использовались следующие литологические разности: суглинки легкие (образец 1), суглинки средние (образцы 2 и 3), суглинки тяжелые (образец 4).

Для изучения влияния мощности элементарного слоя (под которым понимается мощность слоя грунта, засыпаемого одновременно) готовились модели с мощностью элементарного слоя 3,0; 1,0 и 0,5 см. После увлажнения-высушивания первого слоя насыпался следующий слой той же мощности. Затем образцы вновь промачивались до влажности верхнего предела пластичности. Половина модельных образцов промачивалась на всю высоту, а у другой части образцов замачиванию подвергался лишь верхний, только что насыпанный элементарный слой. Второй вариант промачивания исключает влияние такого фактора, как количество циклов увлажнения-высушивания.

Для выяснения влияния количества циклов замачивания-высушивания проводилась следующая серия экспериментов: грунты подвергались одно-, трех- и шестикратному увлажнению-высушиванию. В ходе этих экспериментов высота модельных образцов составляла 3 см, грунты промачивались до влажности верхнего предела пластичности. Для определения просадочных свойств использовались стандартные компрессионные приборы конструкции ЦНИИ МПС. Определение просадочности проводилось при нагрузках 0,05; 0,1 и 0,3 МПа.

Экспериментальные результаты физического моделирования Т.В. Андреевой, как и ранее опубликованные данные, подтвердили возможность формирования высокопористых пород в ходе увлажнения-высушивания осадка. При моделировании образовались искусственные лёссовые породы с пористостью 40—52%, просадочные при нагрузках 0,05; 0,1 и 0,3 МПа. Величина пористости и просадочности искусственных образцов лёссовых пород больше, чем естественных, что объясняется многократным промачиванием эоловой пыли в природных условиях и тысячекратным ее уплотнением после накопления. Это согласуется с ранее опубликованными данными (Галай, 1985).

В процессе высушивания пылеватого материала происходила усадка. Значительная усадка (порядка 15%) наблюдалась, по

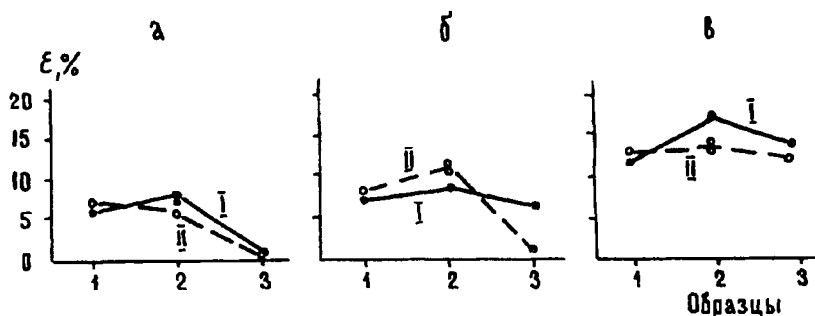


Рис. 25. Зависимость величины относительной просадочности ( $\varepsilon$ ) искусственных образцов (I) и грунтов ненарушенного сложения (II) в воздушно-сухом состоянии от их гранулометрического состава при давлениях, МПа (по Т.В. Андреевой, 1995):

а — 0,05; б — 0,1; в — 0,3. Мощность элементарного слоя 3 см, один цикл увлажнения-высушивания. Образцы: 1 — суглинок легкий; 2 — суглинок средний; 3 — суглинок тяжелый

Т.В. Андреевой, лишь после первого цикла замачивания-высушивания. Максимальных значений она достигала у более тяжелых по литологическому составу разностей. Помимо усадки при дегидратации некоторые образцы (в зависимости от литологического состава) разбивались системой трещин на отдельные блоки. Максимальное растрескивание наблюдалось у образцов 2 и 3. Сильнотрещиноватые образцы отбраковывались. У образцов 1 и 4 образовалась практическая монолитная структура с единичными тонкими трещинами на поверхности. Все образцы искусственных лёссовых пород, несмотря на обильное промачивание и усадку, сохраняли значительную пористость и просадочность.

Полученная Т.А. Андреевой зависимость просадочности искусственно сформированных образцов от их гранулометрического состава показана на рис. 25. Полученные данные свидетельствуют, что величина относительной просадочности возрастает от легких суглинков к средним, а затем происходит ее уменьшение. Такие результаты несколько отличаются от ранее опубликованных (Трофимов, Куликова, 1995), в которых прослеживается возрастание относительной просадочности от супесчаных по составу пород к тяжелосуглинистым. Подобные отличия могут объясняться как различиями в гранулометрическом составе тяжелосуглинистых образцов, использованных при данном моделировании и в экспериментах, проведенных ранее (содержание глинистых частиц ( $< 0,001$  мм) в первом случае 36%, во втором 23%), так и меньшим количеством образцов, использованных в ходе моделирования.

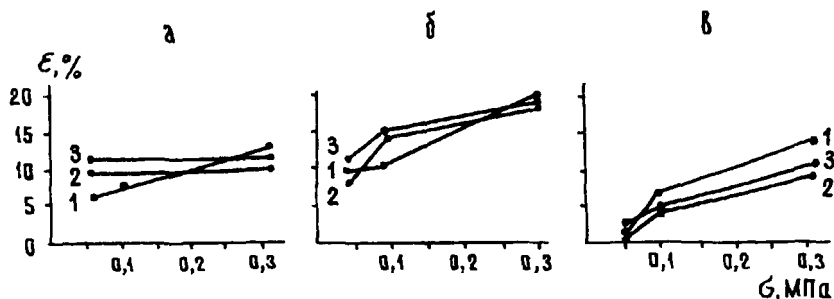


Рис. 26. Зависимость просадочности ( $\epsilon$ ) искусственных образцов в воздушно-сухом состоянии от действующего давления ( $\sigma$ ) при различной мощности элементарного слоя (по Т.В. Андреевой, 1995):

а — суглинка легкого; б — суглинка среднего; в — суглинка тяжелого (мощность слоя: 1—3 см; 2—1 см; 3—0,5 см)

Данные о влиянии мощности осадка, накапливающегося за один этап осадконакопления, на величину формирующейся просадочности приведены на рис. 26 и 27. Видно, что характер изменения величины относительной просадочности от давления для грунтов с разной мощностью элементарного слоя различен для грунтов разного гранулометрического состава. Для суглинков легких (рис. 26, а) величина относительной просадочности мало зависит от мощности слоя. Из средних суглинков при уменьшении мощности элементарного слоя формировались образцы с повышенной пористостью, обеспечивающей большую величину просадочности (рис. 26, б). У образцов тяжелого суглинка с уменьшением мощности слоя, напротив, происходит уменьшение относительной просадочности (рис. 26, в). Это, по-видимому, объясняется тем, что нижние слои промачивались несколько

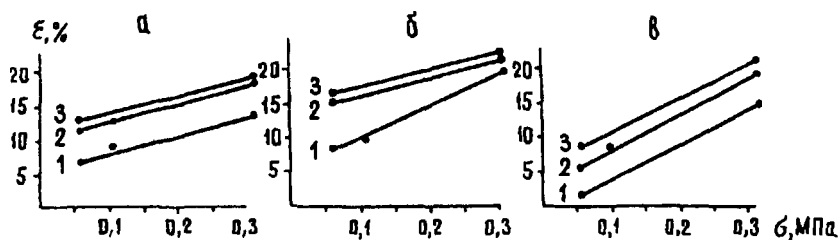


Рис. 27. Зависимость просадочности ( $\epsilon$ ) искусственных образцов в воздушно-сухом состоянии от действующего давления ( $\sigma$ ) при различной мощности элементарного слоя и при неполном промачивании образца (по Т.В. Андреевой, 1995):

а — суглинка легкого; б — суглинка среднего; в — суглинка тяжелого (мощность слоя: 1—3 см; 2—1 см; 3—0,5 см)

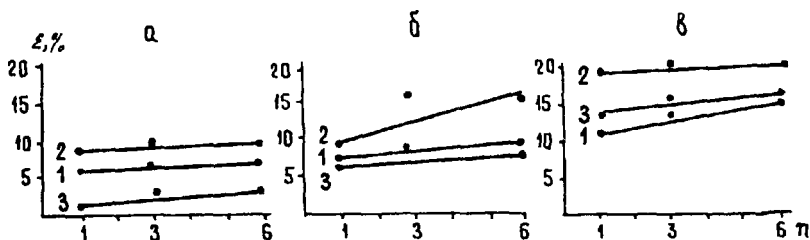


Рис. 28. Зависимость просадочности ( $\epsilon$ ) искусственных образцов в воздушно-сухом состоянии от количества циклов увлажнения-высушивания ( $n$ ) при давлениях, МПа (по Т.В. Андреевой, 1995):

а — 0,05; б — 0,1; в — 0,3 (мощность элементарного слоя 3 см; 1 — суглинок легкий; 2 — суглинок средний, 3 — суглинок тяжелый)

раз. Эти результаты в целом близки к ранее рассмотренным, а некоторые отличия, полученные для средних суглинков, объясняются Т.В. Андреевой повышенной пористостью образцов, которая слабо уменьшается при многократном промачивании нижних слоев в ходе экспериментов.

Для исключения влияния этого фактора Т.В. Андреевой впервые был проведен эксперимент, в ходе которого у образцов при накоплении нового элементарного слоя промачивался лишь он, а нижележащие слои оставались сухими. Результаты этого эксперимента, представленные на рис. 27, свидетельствуют, что с уменьшением мощности элементарного слоя увеличивается величина просадочности, что объясняется повышенной пористостью между отдельными слоями и меньшим уплотнением грунта. Эта зависимость имеет обратную тенденцию по сравнению с результатами, представленными на рис. 26.

В ходе моделирования Т.В. Андреевой получены данные о влиянии количества циклов увлажнения-дегидратации искусственного осадка на величину формирующейся просадочности (рис. 28). Они еще раз подтверждают ранее опубликованные (Трофимов, 1990; Трофимов, Куликова, 1995) результаты: у суглинистых разностей величина формирующейся просадочности возрастает по мере увеличения количества циклов увлажнения-дегидратации; разница в величине относительной просадочности у образцов, подвергавшихся одно- и шестикратному замачиванию, 1—4%.

Таким образом, в процессе лабораторных экспериментов разными авторами получены многочисленные данные, которые позволяют сделать следующие выводы:

- 1) возможно формирование просадочности эоловых лёссовых пород как свойства сингенетического (Трофимов, 1980, 1997)

в соответствии с механизмом, постулированным гипотезой Н.Я. Денисова;

- 2) во всех лабораторных экспериментах в качестве ведущих процессов выступали увлажнение воздушно-сухого пылеватого осадка разной мощности, его дегидратация и замедленное уплотнение при прогрессивном уменьшении влажности по сравнению с водонасыщенным состоянием. Именно вследствие этого в подсыхающем осадке формируется высокопористое сложение, а образовавшаяся порода приобретает сингенетические просадочные свойства. Они формируются при развитии указанных процессов при положительных температурах без участия какого-либо криогенного фактора;
- 3) в ходе физического моделирования на образцах-аналогах экспериментально доказано влияние гранулометрического состава эолового осадка, его мощности, образующейся за один этап осадконакопления, количества циклов увлажнения-дегидратации и температурных условий на поверхности подсыхающего осадка на величину формируемой сингенетической просадочности эоловых отложений.

Экспериментальные исследования формирования просадочности эоловых лёссовых пород в *природных условиях* единичны. Прямые наблюдения за превращением эоловой пыли в просадочную лёссовую породу в климатической обстановке г. Ашхабада и его окрестностей выполнены А.В. Минервиным (1979, 1982). Пыль из концентрированной мглы поступала (16 февраля 1968 г. и 23 декабря 1975 г.) на территорию Прикопетдагской равнины при мощных циклонах, формирование которых происходит один раз в 4—8 лет в пределах Аравийской пустыни.

Эоловая пыль из Аравии отличается высокой пылеватостью и однородностью. В гранулометрическом ее составе резко преобладают крупнопылеватые частицы и тонкопесчаные зерна, которые в сумме составляют 83—85%; на долю глинистых частиц приходится 10—11%, частиц крупнее 0,1 мм — 0,5—2%. Согласно классификации С.С. Морозова, эоловая пыль по гранулометрическому составу соответствует типичным лёссам. Современная эоловая пыль засолена карбонатными солями ( $\text{CO}_2$  карбонатов в исследованных образцах достигает 4—5%). Количество легководно-растворимых солей незначительно: плотный остаток водных вытяжек составляет всего 0,15—0,17% при рН 7,5—8,2.

В минеральном составе пыли преобладают кварц, калиевые полевые шпаты, биотит, калыцит. Глинистые минералы представлены гидрослюдами, смешанослойными образованиями, смектитом; в качестве примесей присутствует каолинит, лимонит, кварц.

Исследованная современная эоловая пыль практически лишена аморфной кремнекислоты.

Пористость эоловой пыли при гигроскопической влажности достаточно высока и достигает 50—55%. Наблюдения за период 23—31 декабря 1975 г. свидетельствуют, что атмосферное увлажнение пыли (исходная влажность около 2%) до влажности 30% и последующее ее высыхание (до влажности 5%) при положительной температуре сопровождалось значительной усадкой. В итоге исследований А.В. Минервиным (1979) установлено, что сформировался весьма плотный пылеватый суглинок с пористостью около 35%, который не обладал просадочными свойствами при нагрузках 0,1, 0,2 и 0,3 МПа<sup>1</sup>.

Во втором эксперименте после пылевой бури 16 февраля 1968 г. на опытной площадке (центр г. Ашхабада) эоловая пыль лёссового состава была изолирована от влияния дождевых осадков. Замачивание сыпучих образцов произошло в результате интенсивной конденсации парообразной влаги в ночное время 16—22 февраля 1968 г. После увлажнения осадка при конденсации паров и последующей дегидратации при высыхании он превратился в прочную, такырообразную, непросадочную (при  $P = 0,3$  МПа) породу.

Казалось бы, что эти данные однозначно свидетельствуют, что формирование сингенетической просадочности у пылеватых эоловых отложений невозможно. Однако единичные данные, приведенные одним и тем же автором, вызывают целый ряд вопросов. Во-первых, они уж слишком противоречат результатам многочисленных, по существу аналогичных лабораторных экспериментов, описанных ранее. Во-вторых, в этих наблюдениях А.В. Минервина совершенно упущено исследование роли циклического увлажнения-высушивания в ходе раннего диагенеза осадка — молодой породы. Эти процессы происходят и существенно влияют, как показали работы разных авторов (Е.Ю. Куликова, Н.В. Коломийцев, Н.Н. Комиссарова, В.И. Осипов, В.Т. Тро-

---

<sup>1</sup> В дальнейшем этот суглинок, по данным А.В. Минервина (1979), вновь увлажнился дождями до влажности 29%; в результате увлажнения произошло его набухание до пористости 37%, затем он промерз и находился в мерзлом состоянии в течение 12 ч. При промерзании молодая порода разуплотнилась и приобрела пористость в 52%. Последующее оттаивание и высыхание образцов (до влажности 5% и менее) при положительных температурах общую пористость эолового лёссового грунта не изменили; относительная просадочность при нагрузках 0,005 МПа составила 0,01, 0,01 МПа — 0,03 и 0,03 МПа — 0,05. По своему генезису эта просадочность является эпигенетической, сформировавшейся за счет действия гипергенно-дегидратационно-разуплотнительного механизма.



фимов) на формирование просадочности лёссовых пород, в том числе сингенетической просадочности эоловых лёссовых пород.

### 3.2.

#### **Экспериментальные данные о формировании сингенетической просадочности делювиальных и пролювиальных лёссовых пород в соответствии с дегидратационно-недоуплотнительной гипотезой Н.Я. Денисова**

Первое экспериментальное лабораторное исследование (*моделирование*) возможности формирования сингенетической просадочности лёссовых пород применительно к условиям образования водонасыщенных осадков в субэразальных условиях (пролювиальный и делювиальный процессы) подобным образом было осуществлено В.Т. Трофимовым и В.С. Бондаренко (1983а). В первой серии опытов в процессе моделирования использовался загипсованный средний лёссовидный суглинок, отобранный из разреза III надпойменной террасы р. Зеравшан в 30 км ниже г. Самарканда; лёссовидный суглинок содержал 1,25% легкорастворимых солей. В процессе эксперимента естественное, природное сложение лёссовидного суглинка нарушалось растиранием. Образовавшаяся сыпучая масса замешивалась на дистиллированной воде до жидкотекучей консистенции, а затем помещалась слоем мощностью около 2 см на жесткую подложку (металлическую чашку диаметром 40 см и высотой 6 см) и высушивалась в течение недели на воздухе при температуре  $+20^{\circ}$  до гигроскопической влажности. На высохший пылеватый осадок наносился новый слой грунтово-лёссовой пасты жидкотекучей консистенции мощностью около 2 см; эта масса вновь высушивалась на воздухе в течение недели. Затем наносился третий слой водонасыщенной лёссовой массы мощностью около 2 см, проводилось высушивание лёссового грунта, как и в двух предыдущих случаях. Затем образец полученного искусственного лёсса прогревался в течение 2 ч до температуры  $40^{\circ}$  и вновь выдерживался на воздухе при температуре  $20^{\circ}$  в течение 1—2 недель.

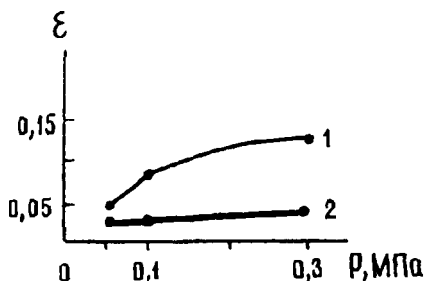
В итоге лабораторного эксперимента был сформирован искусственный структурированный лёссовый монолит высотой 6 см, гигроскопическая влажность которого составила 2%, плотность скелета  $1,26 \text{ г/см}^3$ , пористость 60%. Результаты компрессионных испытаний показали, что искусственные пролювиальные и делювиальные лёссовые породы обладают просадочными свойствами (рис. 29). Коэффициент относительной просадочности при на-

грузке 0,05 МПа составил 0,044, при 0,1 МПа — 0,080 и при 0,3 МПа — 1,136.

Вторая серия опытов выполнена на образцах более легкого гранулометрического состава. К мелкому достаточно хорошо окатанному аллювиальному песку был добавлен легкий лёссовидный суглинок в количестве, которое обеспечило песчано-пылеватый состав искусственной породы (5% частиц размером менее 0,005 мм).

Рис. 29. Зависимость коэффициента относительной просадочности искусственно сформированных образцов от давления (по В.Т. Трофимову и В.С. Бондаренко, 1983):

1 — образец суглинка пылеватого среднего загипсованного, сформированный замешиванием с дистиллированной водой и последующим высушиванием до воздушно-сухого состояния; 2 — образец пылеватого песчаного состава, сформированный таким же способом



Из этой незасоленной, бескарбонатной массы был сформирован структурированный грунт по методике, описанной выше. Гигроскопическая влажность после высушивания достигала всего 1%, плотность скелета — 1,65 г/см<sup>3</sup>, пористость — 38%. Сложение искусственного грунта в целом достаточно рыхлое, структурные мостики между песчаными зернами сложены, как показали электронно-микроскопические исследования, пылеватыми и глинистыми частицами. Этот грунт так же обладал просадочными свойствами (см. рис. 29): коэффициент относительной просадочности при нагрузке 0,05 МПа составил 0,019, при 0,1 МПа — 0,031 и при 0,3 МПа — 0,039.

Первые эксперименты в *природных условиях* были выполнены и описаны А.В. Минервиным (1982а). Им изучалось переотложение эоловой лёссовой пыли дождевыми водами с микровозвышенностей в подножие склонов в геоморфологических условиях слабонерасчлененного микрорельефа Прикопетдагской низменности (пос. Карадамак). При высыхании переотложенной водой лёссовой пыли в условиях положительных температур образовались пылеватые суглинки, непросадочные даже при давлении 0,3 МПа.

На Прикопетдагской равнине А.В. Минервиным были также изучены условия формирования современных пролювиальных отложений во время интенсивных селевых явлений 22—23 апреля и 5—7 мая 1976 г. Характерное мелкое озерцо, где велись

наблюдения, располагалось в 14 км восточнее г. Ашхабада; в это озеро поступали пылеватые осадки тяжелосуглинистого состава из Первомайского ущелья, борта которого сложены среднеплейстоценовыми лёссовыми породами. При высыхании суспензии сформировалась высокопрочная, низкопористая, непросадочная (при  $P = 0,3-0,5$  МПа), полигонально-трещиноватая суглинистая порода. При воздействии отрицательных температур на такие пылеватые суглинки в породе не формируется просадочных свойств. Этот факт объясняется А.В. Минервиным воздействием заморозков в зимние (без осадков) месяцы 1976 г. на воздушно-сухую породу, вода в которой не замерзает и не производит разуплотнения, так как находится в прочносвязном состоянии.

Принципиально иные данные получены для лёссового пролювия Н.Г. Мавляновым (1989) в природных условиях Средней Азии (район г. Ташкента). Эксперимент осуществлялся применительно к фациальной обстановке, отвечающей периферийной части селевого потока, где пылеватый материал осаждался из суспензии в небольших пересыхающих озерах. С целью изучения изменения влажности, пористости и просадочности искусственно отложенного мелкозема в течение года периодически производился отбор десяти параллельных образцов и в каждом определялся коэффициент относительной просадочности в компрессионных приборах при давлении 0,3 МПа. Для формирования искусственного пролювиального пылеватого осадка, отложенного "селем", был использован материал, сформированный из образцов, отобранных в разрезе "Келес" с глубины 12 м.

Первое определение просадочности, проведенное сразу после дегидратации и растрескивания осадка (по типу "такыра"), показало наличие очень слабой просадочности образцов — не более 0,5%. Но это чрезвычайно важно. Это действительно первичная сингенетическая просадочность.

Следующее определение просадочности искусственного лёсса было проведено в начале июня после дождевых осадков. Искусственно сформированные породы были полностью промочены, в них развилось набухание, а затем произошло высыхание. Исследование таких пылеватых образований показало, что просадочность их возросла до 5—10%.

В период максимального прогрева при полном отсутствии дождей (август) не произошло заметного изменения просадочности лёссовых пород по сравнению с величинами предыдущего периода.

Четвертое определение, проведенное поздней осенью (после дождей, но до заморозков), показало незначительное возраста-

ние просадочности (на 1—2%). И все это хорошо согласуется с данными лабораторных экспериментальных работ, выполненных другими авторами.

Здесь же подчеркнем, что последнее определение, проведенное в феврале, после заморозков на почве, показало значительное возрастание просадочности у искусственных пролювиальных лёссовых пород на 5—10%; при этом коэффициент относительной просадочности при давлении 0,3 МПа составил 0,15—0,20<sup>1</sup>.

Природные эксперименты Н.Г. Мавлянова свидетельствуют, что просадочность лёссовых пролювиальных пород Средней Азии — свойство преимущественно сингенетическое в нашем понимании. Это свойство формируется в ходе первичной дегидратации водонасыщенного пылеватого осадка и последующих процессов набухания-усадки молодой породы. Эта просадочность существенно усиливается при действии криогенного фактора.

Пролувиальный пылеватый осадок — молодая порода в аридных жарких условиях Средней Азии приобретает максимальную просадочность в течение года с момента образования (к следующей весне). Последующие гипергенные процессы (погребение образовавшегося горизонта лёссовых пород новым селевым слоем пылеватого мелкозема, промачивание пылеватых осадков атмосферными водами, процессы замораживания-оттаивания и т.д.) изменяют просадочность при формировании разреза и в целом преобразуют лёссовую породу.

Подчеркнем, что эксперименты А.В. Минервина и Н.Г. Мавлянова осуществлялись на разных по гранулометрическому составу образованиях, в неодинаковых условиях атмосферного увлажнения молодой породы. Именно этим, по-видимому, объясняется принципиальное различие результатов моделирования.

Эти первые данные физического моделирования свидетельствуют о возможности формирования сингенетической просадочности в пролювиальных и делювиальных субаэральных лёссовых толщах, накапливающихся в аридных климатических условиях. Однако такой тип просадочности, по-видимому, может формироваться таким образом лишь в разрезах, сложенных относительно легкими по гранулометрическому составу пылеватыми отложениями (лёссами, супесями, легкими и средними суглинками).

Образцы же тяжелосуглинистого состава, судя по результатам моделирования, просадочность не приобретают. При высыхании каждый элементарный слой таких лёссовых пород дает

---

<sup>1</sup> К сожалению, Н.Г. Мавлянов не провел определение просадочности при нагрузках, близких к бытовым.

значительную усадку, сильно растрескивается; межтрещинные блоки приобретают высокую плотность. При накоплении следующего слоя трещины заполняются осадком, в результате чего образуется уплотненный, тонкопористый непросадочный пылеватый грунт.

### 3.3.

#### **Экспериментальные данные о формировании сингенетической просадочности лёссовых пород субаквального генезиса в соответствии с дегидратационно-недоуплотнительной гипотезой Н.Я. Денисова**

Сингенетическая просадочность может сформироваться и при субаэральном диагенезе пылеватого осадка, отложившегося в водной среде. В этом плане несомненный интерес представляют полученные В.Т. Трофимовым, В.С. Бондаренко и Н.А. Румянцевой (1987) данные о формировании просадочных свойств у пылеватых осадков, образовавшихся на склоне чаши водохранилища с большой сработкой уровня воды, после их выхода из-под уровня воды и раннего диагенеза в условиях жаркого летне-осеннего времени.

Чарвакское водохранилище, созданное возведением плотины на р. Чирчик, отличается значительной (до 60—70 м) сработкой уровня воды за летний период после заполнения водохранилища весной. Склоны его чаши достаточно крутые. Однако и на них формируются осадки пылегато-суглинистого состава, которые образуют серию многочисленных небольших горизонтальных или слабонаклонных к центру водохранилища площадок. Они отделены друг от друга уступами высотой от 0,2—0,3 до 0,8—1 м, отвечающих уровням стояния воды в водохранилище летом при его постепенной сработке. После выхода из-под уровня воды эти осадки начинают интенсивно подсыхать за счет испарения воды в условиях жаркого лета<sup>1</sup>. Через некоторое время их влажность в верхних 7—10 см становится равной так называемой влажности воздушно-сухого состояния; ниже залегают влажные отложения. Процесс дегидратации осадка сопровождается его усадкой, вследствие чего поверхность грунтовой толщ разбита трещинами

---

<sup>1</sup> Этот процесс идет с высокой скоростью, о чем, в частности, свидетельствует низкая влажность верхнего слоя пылеватых подсохших пород, залегающих на таких площадках даже на высоте 1—2 м над уровнем воды в водохранилище.

глубиной до 10—12 см (местами более глубокими) на достаточно крупные блоки размером в основном от  $0,3 \times 0,3$  до  $0,5 \times 0,5$  м, которые легко отделяются от нижележащих, более влажных отложений.

Подсохшие осадки этих блоков превратились в хорошо структурированную пылеватую породу, визуальнo очень похожую на лёссовую. В целом ее строение на изломе зернистое, однородное, с крайне редко встречающимися макропорами. Такие ее особенности естественно вызвали вопрос: не является ли эта молодая порода просадочной?

С целью ответа на этот вопрос во второй половине сентября 1986 г. на северном берегу Чарвакского водохранилища в низовой его части близ одного из наблюдательных створов ПГО “Узбекгидрогеология” были отобраны два монолитных образца пород, претерпевших ранний диагенез. Они отбирались непосредственно с поверхности субгоризонтальных аккумулятивных площадок. Первый из этих образцов-монолитов (№ 1, табл. 18) был взят на площадке, которая находилась на глубине около 25 м от максимального весеннего уровня воды в водохранилище, а второй (№ 2, табл. 18) — на площадке на глубине около 35 м (к этому времени сработка уровня водохранилища превысила 70 м). Высота этих образцов составляла около 10 см и каждый из них представлял собой большую часть монолитного блока, отделенного от смежных узкими трещинами усадки.

Отобранные образцы представлены средними лёссовидными суглинками (по классификации С.С. Морозова), в которых тонкопесчаная и крупнопылеватая фракции составляют 60—61% породы, причем содержание крупнопылеватых частиц равно 45—59%. В естественных условиях порода сильно агрегирована, что в еще большей степени усиливает пылеватость ее (см. табл. 18). Коэффициент агрегированности частиц диаметром менее 0,005 мм у первого образца 3,3, у второго 3,6, частиц диаметром менее 0,001 мм — 11,5 и 8,5 соответственно.

Эти образцы имеют сходный минеральный состав. В песчаной и пылевой фракциях преобладают кварц (до 40%), полевые шпаты (до 15%), кальцит (до 15%), доломит (до 10%), амфиболы. В глинистой фракции, по данным В.Г. Шлыкова, диоктаэдрическая гидрослюда составляет до 60%. Кроме того, в ней отмечаются смешанослойные минералы (до 18—20%) гидрослюдистомонтмориллонитового состава с преобладанием разбухающих пакетов, хлорит (до 15%), каолинит (до 7%) и палыгорскит (до 8%). Общее количество карбонатов и гипса в первом образце — 18,9 и 0,1% соответственно, во втором — 17,5 и 0,14%, сухой остаток водной вытяжки — 0,045 и 0,038%.

Таблица 18

**Гранулометрический (А), микрометрический (Б)  
и химический состав пылеватых пород**

Номер образца	Состав грунта	Содержание частиц по фракциям (диаметр в мм), %					Сухой остаток водной вытяжки, %	Содержание, %	
		0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	<0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	карбо- натов	гипса
1	А	1	1	59	39	6	10	23	
	Б	1	16	64	19	9	8	2	18,9 0,16
2	А	3	16	45	36	7	12	17	
	Б	2	20	56	22	14	6	2	17,5 0,14
3	А	1	5	46	49	13	13	23	
	Б	3	12	55	30	12	14	4	21,0 0,17

Примечание. Гранулометрический и микрометрический анализы выполнены песочным методом. Подготовка к первому из них проводилась расклатыванием образцов с пирофосфатом натрия, во втором — по методике Н.А. Калининского.

Строение этих образований, как показали исследования на электронном сканирующем микроскопе, однородное и изотропное, что отчетливо видно при сравнении фотографий сколов, параллельных напластованию и перпендикулярных к нему. Пористость просмотренных препаратов высокая (до 41%), поры в основном изометрической формы, открытого типа. У первого из описываемых образцов средний диаметр внутриагрегатных пор равен 3,4 мкм, межагрегатных — 17,1 мкм, средняя площадь внутриагрегатных пор 8,9 мкм, межагрегатных 230 мкм<sup>2</sup>; у второго образца эти показатели составляют 4,8 и 19,3 мкм, 17,8 и 292 мкм<sup>2</sup>.

Микроструктура породы зернистая. Контакты между крупными структурными элементами осуществляются в основном за счет глинистых структурных мостиков, частично — посредством периферийных частей глинистых рубашек, сформировавшихся на поверхности песчаных и особенно пылеватых частиц. Именно в местах их контакта наблюдается скопление глинистых и коллоидных частиц (Трофимов и др., 1987).

Результаты изучения свойств описываемых образцов приведены в табл. 19. Подчеркнем лишь, что в условиях сухого и жаркого лета вышедшие из-под уровня воды осадки высыхают до очень низких значений влажности (2—3%). Этот процесс сопровождается, как уже отмечалось, усадкой, последствия которой на поверхности толщи четко выражены полигональной сетью трещин. Однако, несмотря на усадку, пористость пород остается высокой и составляет, по определению в пробе объемом около 100 см<sup>3</sup>, 44—46%.

Таблица 19  
Естественная влажность  
и свойства пылеватых пород

Номер образца	Влажность естественная, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>			Пористость, %	Показатель пределов пластичности, %		Коэффициент относительной просадочности при нагрузке (в МПа)	
		твердых частиц	грунта	скелета грунта		верхний	нижний	0,1	0,3
1	3	2,74	1,53	1,49	46	27	20	0,06	0,09
2	2	2,73	1,55	1,52	44	26	20	0,01	0,06
3	2	2,72	1,55	1,53	43	28	20	0,04	0,16



Прямые определения просадочности, выполненные методом одной кривой, показали, что высохшие в субаэральных условиях после выхода из-под уровня воды осадки, сформировавшиеся в чаще водохранилища, приобрели четко выраженные просадочные свойства при нагрузках, превышающие природные<sup>1</sup>. При нагрузках 0,1 и 0,3 МПа коэффициент относительной просадочности составил у первого образца 0,06 и 0,09, у второго — 0,01 и 0,06 соответственно (см. табл. 19).

Описанный случай возникновения просадочных грунтов симптоматичен тремя главными особенностями:

- огромной скоростью формирования просадочности в объеме элементарного слоя;
- возможностью образования в аридных условиях просадочных при дополнительных нагрузках пылеватых пород водного генезиса, их просадочность является (в основном!) сингенетическим свойством и формируется на стадии раннего диагенеза водных осадков;
- возможностью образования просадочности без какого-либо действия криогенного фактора; ведь за время, прошедшее с момента выхода осадка из-под уровня воды и его иссушения до отбора образцов, температура грунтов и воздуха в районе была положительной.

Следует подчеркнуть, что если криогенный фактор в данном случае не работал, то гипергенный, несмотря на короткий срок перехода осадка в породу и периода ее существования до отбора образца, должен был уже проявиться, так как после реализации усадки порода испытывала воздействие поля переменных температур (суточные колебания) и влажности (суточные колебания влажности воздуха, увлажнение выпадающими дождями и последующее высыхание и т.п.). Для оценки их роли в формировании просадочности необходимы режимные наблюдения в массиве, поскольку влияние циклического увлажнения-высыхания пылеватых пород в их разуплотнении и образовании просадочности в лабораторных экспериментах уже доказано.

Интересными представляются и данные о “сохранении” просадочности у лёссовых пород, периодически (почти ежегодно) затапливаемых водами водохранилища при максимальном уровне

---

<sup>1</sup> Определение просадочности при природной нагрузке, составляющей первые десятки граммов на 1 см<sup>2</sup>, не проводилось. В дальнейших исследованиях генезиса просадочности это должно быть сделано

и высыхаемых в субаэральных условиях после сработки. В пределах того же участка с обнаженной поверхности склона в сентябре 1986 г. на оползневой ступени был отобран монолитный образец тяжелого лёссовидного суглинка (№ 3, табл. 18 и 19). Эти делювиальные по генезису породы слагают верхнюю часть разреза крупного оползня. При максимальном уровне воды в водохранилище отобранный образец находился на глубине около 10 м.

После выхода из-под уровня воды и высыхании эти породы имеют четко выраженный лёссовый облик, отличаются низкой влажностью и высокой пористостью (см. табл. 19). По минеральному составу они аналогичны вышеописанным. Их структура макропористая. Некоторые макропоры заполнены "вымтым" пылеватым материалом. Нередко он образует своеобразные прочные в сухом состоянии псевдооолитики, которые в виде целых шариков диаметром до 2—3 мм могут быть извлечены из вмещающих их пор.

Микростроение этих пород зернистое, участками агрегативно-зернистое. На сколах, параллельных напластованию, на тонкопористом фоне видны крупные поры. Средний диаметр внутриагрегатных пор 4,5 мкм, межагрегатных 21,7 мкм, средняя площадь первых 16,1 мкм<sup>2</sup>, вторых 368 мкм<sup>2</sup>. Контакты между крупными структурными элементами осуществляются и здесь за счет глинистых структурных мостиков, или посредством агрегатов очень мелкого размера. В ряде случаев на контакте между частицами отмечены скопления карбонатов и гипса (Трофимов и др., 1987).

Итак, впервые получены экспериментальные доказательства формирования просадочности преимущественно как сингенетического свойства у отложений, накопившихся в водной среде, в ходе их раннего диагенеза, но уже в субаэральной обстановке. И в этом видится принципиальная новизна приведенных данных.

Следует также подчеркнуть, что многие зависимости получены экспериментально впервые. И хотя выборка образцов, использованная в процессе лабораторного моделирования (см. разделы 3.1—3.2), достаточно разнообразна и представительна, необходимы дополнительные экспериментальные работы в этом направлении. Наибольшее внимание следует уделить расширению выборки по гранулометрическому и особенно по химико-минеральному составу пылеватого материала, используемого в эксперименте.

Отметим, что все описанные в разделах 3.1—3.2 эксперименты выполняли, используя для формирования искусственного осадка

(аналога эоловых отложений) пылеватый материал, полученный при растирании природных лёссовых пород. Поэтому в ходе экспериментов моделировалось, строго говоря, новообразование эоловых, делювиальных и пролювиальных пород за счет переотложения ранее сформированных лёссовых толщ. В связи с этим крайне важно было провести эксперименты по изучению формирования просадочности у осадков, "накапливаемых" с использованием первичных песчаных, пылеватых и глинистых частиц, агрегаты из которых образуются непосредственно в ходе их осаждения и последующих гидратации-дегидратации осадка. Перейдем к обсуждению результатов таких экспериментов.

### 3.4.

#### **Экспериментальные данные о формировании сингенетической просадочности пылеватых полидисперсных полиминеральных смесей чистых минералов в соответствии с дегидратационно-недоуплотнительной гипотезой Н.Я. Денисова**

Вопрос о постановке таких экспериментов был поставлен нами (Трофимов, 1990) и составлена программа таких исследований, реализованная в 1997 г. совместно с А.С. Ветровым и В.Н. Соколовым.

Минеральные компоненты для изготовления таких смесей получались за счет дробления в шаровой мельнице и последующего фракционирования монокристаллов соответствующих минералов. Стандартные фракции размером более 0,25, 0,25—0,1, 0,1—0,05 и менее 0,05 мм получались ситовым методом, а фракции 0,05—0,01, 0,01—0,005, 0,005—0,001 и менее 0,001 мм — методом отмучивания.

Для составления искусственных пылеватых полидисперсных полиминеральных смесей использовались девять главных породообразующих минералов, характерных для лёссовых пород низменных равнин (Ларионов и др., 1959; Ананьев, Коробкин, 1980): кварц, полевой шпат, кальцит, слюда, гипс, амфибол, каолинит, гидрослюда, монтмориллонит. При этом готовились семь размерных фракций кварца (от  $< 0,001$  до  $> 0,25$  мм), три фракции полевого шпата (0,25—0,1; 0,1—0,05; 0,05—0,01 мм), четыре фракции кальцита (0,1—0,05; 0,05—0,01; 0,01—0,005; 0,005—0,001 мм), две фракции биотита (0,1—0,05; 0,05—0,01 мм), по одной фракции роговой обманки и гипса (0,05—0,01 и 0,1—0,05 мм соответственно) и по две фракции каолинита (0,01—0,005; 0,005—0,001 мм) и монтмориллонита (0,005—0,001,  $< 0,001$  мм).

Морфологические особенности полученных минеральных зерен в пределах каждой из фракции предварительно изучались В.Н. Соколовым с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ). Эти исследования показали, что зерна кварца имеют изометричную форму с острыми неровными краями и гладкой поверхностью, зерна полевого шпата — ребристую поверхность с характерной спайностью. Форма зерен кальцита изменялась от округлой (по-видимому, результат взаимного трения зерен при дроблении в шаровой мельнице) до прямоугольной. Поверхность зерен гладкая с заметной спайностью. Частицы биотита имеют вытянутую пластинчатую форму, а для частиц гипса характерна игольчатая форма. На поверхности всех описанных выше частиц, наблюдалось большое количество прилипших мелких частиц, что явилось результатом взаимной электризации частиц при помоле. Зерна роговой обманки имели прямоугольную форму с неровной поверхностью, однако в отличие от других минералов их поверхность была чистой и не содержала никаких мелких прилипших частиц.

Микроагрегаты частиц гидрослюды с размерами от 3 до 8 мкм имеют изометрическую в плане форму и представляют собой толстые пластины с округлыми краями. На поверхности этих микроагрегатов видны отдельные частицы в виде тонких пластин изометричной и удлинённой формы, длина которых не превышает 0,3—0,7 мкм. Микроагрегаты каолинита имеют изометричную доменоподобную форму. Они сложены аксиально-ориентированными частицами пластинчатой формы с псевдогексагональной огранкой. Размер микроагрегатов изменяется от 3 до 10 мкм. Микроагрегаты монтмориллонита имеют изометричную или удлинённую (веретенообразную) форму. Максимальный размер таких микроагрегатов достигает 10—30 мкм. Монтмориллоновые частицы плотно прилегают друг к другу, формируя губчатую микроструктуру.

В соответствии с литературными данными о минеральном составе лёссовых пород и их гранулометрическом составе были составлены теоретические комбинации и из выделенных мономинеральных фракций подготовлено шесть искусственных полиминеральных, полидисперсных смесей, соответствующих по гранулометрическому составу лёссу легкосуглинистому тонкопесчанистому, лёссу среднесуглинистому крупнопылевато-тонкопесчанистому (2 образца), “обобщенному” лёссу и лёссовидной супеси по классификации С.С. Морозова (табл. 20).

В дальнейшем каждая полиминеральная смесь в виде хорошо перемешанного порошка засыпалась в обойму-кольцо с диамет-

Таблица 20

## Состав экспериментальных смесей

Порода	Минералы	Размер фракций, мк					
		> 0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001
		Содержание минералов в фракции, %					
1	2	3	4	5	6	7	8
Глесс легкосугли- нистый тонко- песчанистый (модель А)	кварц	1	2	39	14	12	
	полевой шпат			3	3		
	кальцит			6	2	1	1
	роговая обманка		1		1		
	биотит			2	1		
	кзолинит					2	1
	гидростюда						1
	монтмориллонит						2
46220		1	3	50	21	15	3
Глесс среднесугли- нистый тонко- песчанистый (модель Б)	кварц	1	2	31	21	12	
	полевой шпат			3	2		1
	кальцит			4	1		
	роговая обманка		1		1		
	биотит			1	1		
	гипс			1			
	кзолинит					3	1
	гидростюда						2
46220	монтмориллонит						1
		1	3	40	26	15	5
							10

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Лес лесостепно-лесистый крупно-пылевато-песчаный (модель В)	кварц	1	2	12	43	13	1	
	полевой шпат			4	2			
	кальцит			3	3			
	роговая обманка		1		1			
	биотит			1	1			
	гипс			1				
	кварцит					2		
	гидростала						1	3
Лес лесостепно-лесистый крупно-пылевато-песчаный (модель Г)	монтмориллонит						1	4
	всего	1	3	21	80	15	3	7
	кварц	1	2	20	32	14	1	
	полевой шпат			2	3			
	кальцит			2	4			
	роговая обманка		1					
	биотит			1	1			
	гипс			1				
	кварцит					1		1
	гидростала						3	5
	монтмориллонит						1	4
	всего	1	3	26	40	15	5	10

1	2	3	4	5	6	7	8	9
"Обобщенный" лёсс (модель Д)	кварц	1	3	34	26	13	1	
	полевой шпат			2	2			
	кальцит			4	1			
	роговая обманка				1			
	биотит			1				
	каолинит					2	1	2
	гидрослюда						1	3
	монтмориллонит							2
	всего	1	3	41	30	15	3	7
Лёссовидная су- песь (модель Е)	кварц	1	19	26	16	5	1	
	полевой шпат		2	8	1			
	кальцит			5	2			
	роговая обманка		1					
	биотит				1			
	гипс			1				
	каолинит					2		
	гидрослюда					3		2
	монтмориллонит						2	2
	всего	1	22	40	20	10	3	4

ром 2,6 см и высотой 1 см. Всего было подготовлено 72 таких образца в кольцах для шести составленных экспериментальных смесей по три для каждой серии гидратации-дегидратации образцов. Таких серий было четыре, замачивание-высушивание в рамках которых проводилось 10, 15, 20, 25 раз соответственно. Замачивание проводилось сверху через бумажный фильтр дистиллированной водой при температуре 20°, так, чтобы предотвратить вынос материала из смесей снизу. Для исключения боковой фильтрации стенки колец смазывались вазелином. Полное высушивание образцов достигалось через двое-четверо суток после замачивания. Для всех образцов проводился контроль за плотностью, влажностью и пористостью, определялась относительная просадочность методом одной кривой при нагрузке 0,1 МПа, а также проводились исследования микростроения сформировавшихся образцов-пород. Результаты этих определений приведены в табл. 21.

Изучение микроструктуры образцов проводилось с помощью высокоразрешающего растрового электронного микроскопа РЭМ "НИТАСН-800". Влажные образцы для исследования готовились по методу вакуумной морозной сушки (Осипов и др., 1989).

Анализ данных табл. 21 показывает, что плотность образцов, сформировавшихся в ходе циклического замачивания-высушивания воздушно-сухих смесей-моделей, изменяется от 1,07 до 1,38 г/см<sup>3</sup>, что находится в соответствии с плотностью природных лёссовых пород (1,12—1,79 г/см<sup>3</sup>). Пористость модельных образцов меняется от 48 до 60%. Наибольшую плотность и наименьшую пористость имеют образцы смеси-модели Е — лёссовидная супесь: 1,31—1,38 г/см<sup>3</sup> и 48—50% соответственно. Наименьшая плотность и наибольшая пористость характерны для смеси-модели В — лёсса легкосуглинистого крупнопылевато-тонкопесчанистого: 1,07—1,22 г/см<sup>3</sup> и 55—60% соответственно.

Исследование микростроения полученных модельных образцов доказало, что по мере возрастания количества циклов замачивания-высушивания происходят изменения как в строении твердых структурных элементов, характере контактов между ними, так и в структуре порового пространства. Большую роль при формировании микростроения модельных образцов играют количество и минеральный состав глинистой фракции, а также минеральный состав тонкопесчаной и пылевой фракций. Так, в образцах-моделях А, Б и Г при 10 циклах увлажнения-высушивания наблюдается, по В.Н. Соколову, скелетно-матричная микроструктура, сложенная хаотически ориентированными в пространстве тонкими пылевыми частицами с размерами 3—5 мкм и глинисто-пылевыми микроагрегатами с размерами 5—8 мкм.



Таблица 21

Сопоставление дисперсного состава образцов экспериментальных смесей  
и их свойств до и после моделирования

Модель	Количество циклов увлажне- ния	Гранулометрический состав смеси, %			Исходный образец (до моделирования)		Образец, сформированный в ходе моделирования		Влаж- ность после просадки, %	Относительная просадочность при нагрузке 0,1 МПа
		песчаная > 50 мкм	пылеватая 50-5 мкм	глинистая < 5 мкм	плотность, г/см <sup>3</sup>	пористость, %	плотность, г/см <sup>3</sup>	пористость, %		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
А	10	54	36	10	1,12	58	1,15	58	31	0,160
	15	54	36	10	1,23	54	1,29	52	35	0,068
	20	54	36	10	1,25	53	1,29	52	30	0,048
	25	54	36	10	1,14	57	1,15	57	31	0,083
Б	10	44	41	15	1,12	58	1,13	58	31	0,064
	15	44	41	15	1,21	55	1,27	52	31	0,041
	20	44	41	15	1,16	57	1,20	55	30	0,049
	25	44	41	15	1,10	59	1,10	59	31	0,038
В	10	25	65	10	1,05	60	1,07	60	31	0,101
	15	25	65	10	1,10	59	1,13	58	31	0,090
	20	25	65	10	1,19	55	1,22	55	31	0,090
	25	25	65	10	1,14	58	1,14	58	31	0,090

Продолжение табл. 21

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Г	10	30	55	15	1,11	58	1,14	58	29	0,091
	15	30	55	15	1,11	58	1,14	58	32	0,152
	20	30	55	15	1,18	56	1,25	53	30	0,058
	25	30	55	15	1,14	56	1,18	56	32	0,090
Д	10	45	45	10	1,30	51	1,32	51	28	0,090
	15	45	45	10	1,17	56	1,19	55	29	0,158
	20	45	45	10	1,20	55	1,24	53	29	0,135
	25	45	45	10	1,27	52	1,29	52	30	0,073
Е	10	63	30	7	1,28	52	1,31	51	27	0,152
	15	63	30	7	1,32	51	1,35	50	26	0,082
	20	63	30	7	1,29	52	1,32	51	26	0,100
	25	63	30	7	1,35	50	1,38	48	26	0,057

Песчано-пылеватые зерна погружены в эту матрицу и часто не имеют непосредственных контактов друг с другом. Песчано-пылеватые зерна размером 50—70 мкм имеют угловатую, но изометричную форму, поверхность зерен чистая. Такой тип микроструктуры определяется довольно высоким содержанием тонких фракций (менее 0,005 мм) и малым содержанием минеральных зерен в пылевой фракции (0,005—0,05 мм).

Поровое пространство в основном состоит из микроагрегатных и в меньшей степени межмикроагрегатно-зернистых пор изометричной формы, размер которых может изменяться от 20 до 100 мкм. Преобладают поры с размерами 20—40 мкм. В тех случаях, когда в исходной смеси содержание глинистой фракции мало (например, модели В, Д, Е), после десяти циклов замачивания-высушивания наблюдалась скелетная микроструктура, при этом обломочные зерна контактируют друг с другом или непосредственно, или через тонкие глинисто-пылеватые мостики. Поверхность песчано-пылеватых зерен также чистая. Поровое пространство в таких образцах в основном сложено изометричными по форме порами с размерами 30—100 мкм.

По мере возрастания количества циклов увлажнения-высушивания до 15 в микростроении модельных образцов происходят существенные изменения. Прежде всего происходит исчезновение сплошной глинистой матрицы и возникают обособленные микроагрегаты, по размеру соизмеримые с зернами (~ 50—70 мкм). На поверхности некоторых зерен начинают образовываться глинистые рубашки. Поровое пространство образцов на данном этапе в основном сложено крупными межмикроагрегатно-зернистыми порами изометричной формы с размерами от 10 до 30 мкм. В некоторых образцах (модели А, Б, Д) начинают формироваться крупные макропоры с размерами до 300 мкм в диаметре, являющиеся результатом выхода пузырьков воздуха из образца при его циклическом увлажнении-высушивании.

После двадцати циклов увлажнения-высушивания в исследуемых образцах модельных грунтов происходит процесс обособления микроагрегатов, сопровождающийся сокращением их размеров. В зависимости от соотношения глинистой, пылевой и песчаной фракций микроструктура искусственных грунтов тяготеет или к зернисто-агрегативной (модели А, Б, В, Г), или к агрегативно-зернистой (по классификации А.К. Ларионова, 1959, 1986). По классификации В.И. Осипова и В.Н. Соколова (Осипов и др., 1989), эти микроструктуры можно назвать переходными матрично-скелетного и скелетного типов соответственно. В целом, микростроение становится более однородным, меньше становится крупных макропор.

Интересным моментом является факт большего развития глинистых рубашек на поверхности пылеватых зерен. Однако необходимо отметить избирательность зерен различного минерального состава к процессу формирования глинистых рубашек. В основном они формируются на поверхности кварцевых пылеватых зерен, тогда как поверхность полевошпатовых зерен обычно бывает более чистой. Возможно этот факт объясняется специфической зарядкой поверхности кварцевых частиц при их гидратации в воде и более интенсивным ионно-электростатическим взаимодействием между поверхностью частиц глинистых минералов и поверхностью кварцевого зерна.

После 25 циклов увлажнения-высушивания существенных изменений в микростроении исследуемых модельных грунтов не происходит. Как правило, она представляет собой типичную скелетную микроструктуру, содержащую помимо зерен также и глинисто-пылеватые микроагрегаты изометричной формы. Тем не менее именно после 25 циклов попеременного увлажнения-высушивания в образце-модели Д были найдены структурные элементы округлой формы (пылеватые зерна), покрытые толстыми глинистыми рубашками, схожие по строению с глобулярными агрегатами, присутствующими в естественных лёссах. В целом микроструктура модельных грунтов становится похожей на скелетную микроструктуру естественных лёссов.

Все сформированные по описанной методике модельные образцы обладают просадочностью. Величина относительной просадочности при замачивании под нагрузкой 0,1 МПа изменяется от 0,038 до 0,160 (см. табл. 21). Какой-либо закономерности между относительной просадочностью и количеством циклов замачивания-высушивания проследить не удалось. В целом имеется тенденция, что большая относительная просадочность наблюдается у более пористых образцов. Высокие значения относительной просадочности можно объяснить большой активной пористостью образцов. Влажность образцов после просадки изменяется от 26 до 35%, что можно объяснить некоторыми различиями содержания глинистой фракции и ее минеральным составом.

Таким образом, результаты описанных экспериментов позволяют утверждать, что возможно формирование специфической структуры лёссовых пород и их сингенетической просадочности в условиях циклического увлажнения-высыхания из первоначально воздушно-сухого пылеватого полидисперсного и полиминерального осадка, состоящего из первичных (чистых) породообразующих минералов.

**Экспериментальные данные о формировании  
сингенетической просадочности лёссовых пород  
в соответствии с криосингенетическо-сублимационной  
гипотезой А.В. Минервина—Н.Н. Комиссаровой**

В литературе описан результат лишь одного эксперимента, моделирующего механизм действия данной гипотезы, проведенный самим ее автором (Минервин, Комиссарова, 1983).

В природных условиях Южно-Минусинской впадины в течение 1974—1975 гг. был выполнен следующий эксперимент. Для образования искусственного модельного грунта использовались местные аллювиальные лёссовые породы со специально нарушенным для этого природным сложением, увлажненные в большой емкости. Высоковлажный искусственный осадок порциями осаждался в течение зимних месяцев в котлован емкостью  $1 \text{ м}^3$ , причем каждый последующий выпшележащий слой наносился после промерзания предыдущего, т.е. в основании каждого нового промерзающего слоя, за исключением первого из них, всегда был мерзлый субстрат. Такой ход промерзания соответствует синкриогенному.

В итоге к концу февраля 1974 г. А.В. Минервиным была получена толща мерзлых высокопористых (50% и несколько выше) пылеватых пород мощностью около 1 м. В течение последующих зимних месяцев, весны и лета произошла вначале некоторая сублимация льда, а затем быстрая деградация мерзлоты в искусственно сформированной толще и одновременно ее сильное иссушение (до весовой влажности около 10%). Высокая пористость пылеватой искусственной породы при этом практически не изменилась (рис. 30). При последующем замачивании таких пород в котлованах установлена их просадка величиной 2—3%.

Этот, по-своему уникальный, эксперимент лишь отчасти соответствует гипотезе А.В. Минервина, поскольку все изменения влажности, пористости и фазового состояния влаги происходили в слое сезонного промерзания искусственно созданной толщи лёссовых пород. Он не дает ответа на вопрос, возможна ли работа такого механизма дегидратации в мощных толщах сингенетически промерзших пылеватых пород. Он, скорее, доказывает роль криогенных процессов в слое сезонного промерзания в разуплотнении пород “водного” генезиса, т.е. работы криоаллювиальной и даже гипергенно-дегидратационно-разуплотнительной гипотез.

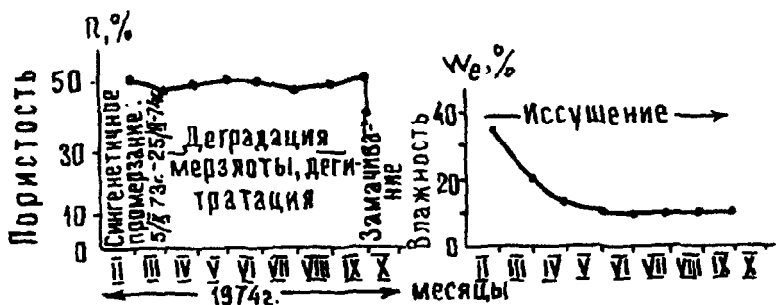


Рис. 30. Формирование и сохранение высокой пористости в искусственно промороженных ("синкриогенных") пылеватых породах при быстрой деградации сезонной мерзлоты и последующем летнем иссушении толщи (по А.В. Минервину и Н.Н. Комиссаровой, 1983)

Итак, полученные разными авторами экспериментальные результаты дают основание утверждать о возможности образования просадочности у золовых, пролювиальных, делювиальных отложений как свойства сингенетического в нашем понятии (Трофимов, 1980, 1997). Физическое лабораторное моделирование, выполненное по различным схемам, убедительно свидетельствует, что просадочность может формироваться при увлажнении пылеватого высокопористого воздушно-сухого осадка или осаждения его водным путем при последующей его дегидратации на разных стадиях субаэрального литогенеза. Просадочность формировалась в искусственных образцах элементарного слоя верхней части массива лёссовых пород как в случае воздействия только веса увлажненно-высыхающего осадка, так и в случае воздействия на лёссовые пылеватые образцы дополнительных нагрузок. Первый результат чрезвычайно важен. Именно он свидетельствует, что гипотетические построения, изложенные Н.Я. Денисовым, работают, являются экспериментально подтвержденными.

## ПРОСАДОЧНОСТЬ КАК ЭПИГЕНЕТИЧЕСКОЕ СВОЙСТВО ЛЁССОВЫХ ПОРОД — ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА

---

Напомним, что основное отличие эпигенетической просадочности лёссовых пород от вышерассмотренной сингенетической заключается в том, что: 1) ее образование происходит в ходе прогрессивного или регрессивного литогенеза уже существующих горных пород (а не свежесложившихся осадков); 2) формирование просадочности этого типа происходит при относительной стационарности поверхности данного геоморфологического элемента или даже его денудации.

Результаты исследований в этом направлении более многочисленны. Они выполнены как в лабораторных условиях, так и в природных массивах. Большая часть этих экспериментов была направлена на выяснение работы механизмов, постулированных в дегидратационно-доуплотнительной гипотезе Н.Я. Денисова и гипергенно-дегидратационно-разуплотнительной гипотезе.

### 4.1.

#### **Экспериментальные данные о формировании эпигенетической просадочности аллювиальных лёссовых пород в соответствии с дегидратационно-доуплотнительной гипотезой Н.Я. Денисова**

Первые лабораторные эксперименты в этом направлении были проведены на монолитных образцах обычного размера (30 × 30 × 30 см) автором этой книги и В.С. Бондаренко (Трофимов, Бондаренко, 1983).

В первой серии опытов были использованы монолитные образцы современного аллювиального суглинка, скрытослоистой микрофации, отобранные с глубины 0,5—0,8 м в пойме Иртыша

близ г. Ханты-Мансийска. По составу это суглинок тяжелый пылеватый, содержащий 24% частиц меньше 1 мкм и 75% пылеватых частиц, среди которых резко доминирует крупнопылеватая фракция (0,05—0,01 мм — 58%). В естественных условиях порода сильно агрегирована: при микроагрегатном анализе выход частиц меньше 1 мкм составил 4%, пылеватых — 83 (крупнопылеватой фракции — 63%), песчаных — 16%. Порода не засолена: сухой остаток 0,07%, реакция водной вытяжки близка к нейтральной. Содержание карбонатов составляет 0,07%. Естественная весовая влажность суглинка 39%, степень влажности 0,76, плотность скелета 1,12 г/см<sup>3</sup>, пористость 58%. В грунте много корней, макропор субвертикального направления. Микроструктура его скелетная. Этот грунт сильно сжимаемый; просадочностью он не обладал.

Два монолитных образца этого грунта были вскрыты сверху (изоляционный слой снизу и с боков монолитов оставлялся) и подсыхали на воздухе при температуре около 20°. Через некоторое время (обычно 7—10 дней) из самой верхней части вырезались кольца грунта для определения просадочности при данной влажности, а оставшийся монолит грунта продолжал подсушиваться на воздухе. Через такой же промежуток времени эти операции повторялись. В итоге были получены данные о просадочности грунта при разных действующих нагрузках при влажности 28, 22, 11, 6 и 4%.

Следует подчеркнуть, что подсушивание грунта в монолите при вскрытии только верхней его поверхности обеспечивает постепенное и достаточно равномерное снижение влажности в верхней его части. Усадка грунта при этом оказалась незначительной, несмотря на высокое содержание тонкодисперсных частиц и большую исходную (естественную) влажность. Об этом, в частности, свидетельствуют лишь небольшое увеличение плотности скелета (с 1,12 до 1,16—1,17 г/см<sup>3</sup> при влажности 4—6%) и снижение пористости с 58 до 56%. В процессе дегидратации и усадки в грунте наблюдалось образование отдельных микротрещин, особенно при достижении низких значений влажности. Однако их длина и, главное, число были невелики. Усиление агрегации частиц, судя по данным микроагрегатного анализа, было крайне слабым: коэффициент агрегированности частиц менее 1 мкм возрос с 6 до 8,3 (при влажности 6%), для частиц менее 5 мкм он изменялся в пределах 3—4.

Определение просадочности подсушенного грунта при каждой влажности проводилось при нагрузках 0,05, 0,1 и 0,3 МПа. Полученные результаты свидетельствуют, что при снижении влажности высокопористый аллювиальный суглинок приобрета-



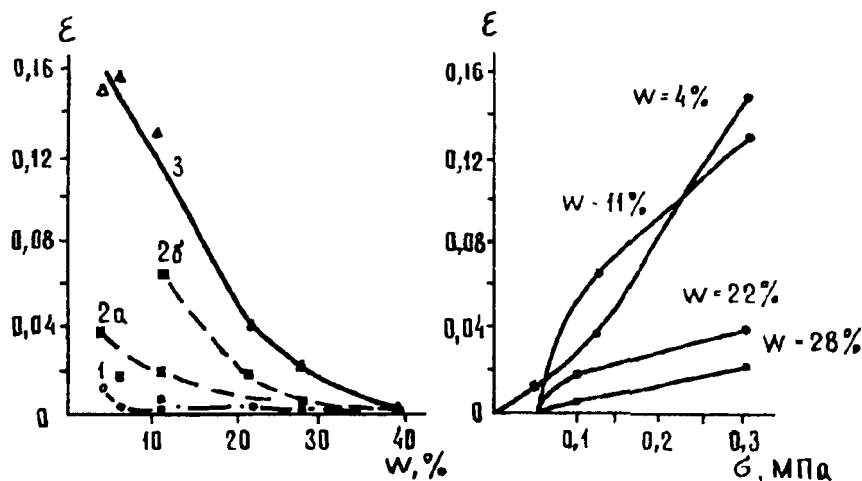


Рис. 31. Зависимость коэффициента относительной просадочности подсушенного современного аллювиального суглинка скрытослойной микрофации при разных влажностях от нагрузки (по В.Т. Трофимову и В.С. Бондаренко, 1983). Для нагрузок: 1 — 0,05 МПа; 2 — 0,1 МПа; 3 — 0,3 МПа. Кривые 2а и 2б получены для проб грунта, вырезанных из разных монолитов одинакового по составу грунта

ет просадочные свойства при нагрузках, превышающих бытовые (они близки к 0,01 МПа). При нагрузке 0,05 МПа коэффициент относительной просадочности превышал 0,01 лишь при влажности 4% (степень влажности 0,08); при нагрузке 0,1 МПа он был больше этой величины уже при влажности 22% (0,47), а при нагрузке 0,3 МПа — даже при влажности 28% (0,62). При последующем уменьшении влажности величина коэффициента относительной просадочности закономерно возрастала (рис. 31).

Еще один образец аллювиального суглинка совершенно аналогичного состава был отобран в шурфе в 20 м от тех, которые использовались в предыдущем эксперименте. Он имел такую же высокую естественную влажность (39%), но был несколько плотнее (плотность скелета 1,20 г/см<sup>3</sup>). Его подсушивание велось на воздухе по аналогичной методике. В итоге длительной дегидратации его влажность достигла 2%, степень влажности 0,05; плотность скелета при этом составила 1,24 г/см<sup>3</sup>, пористость 53%. Определение просадочности показало, что при нагрузках, превышающих бытовую и равных 0,05, 0,1 и 0,3 МПа, величина коэффициента относительной просадочности составила 0,010, 0,034 и 0,092 соответственно. Эти значения достаточно близки к величинам коэффициента относительной просадочности, полученным в вышеописанной серии опытов при влажности грунта около 4%.

Аналогичная по существу серия опытов была проведена на монолитных образцах современного аллювиального суглинка линзовидно-слоистой микрофации, отобранного с глубины 0,3—0,6 м в пойме р. Оби (протока М. Салымская Обь выше г. Ханты-Мансийска). По валовому гранулометрическому составу он является суглинком легким, содержащим 11% частиц меньше 1 мкм, 47% — пылеватых частиц (из них 37% представлено крупнопылевой фракцией), 42% песчаных (20% из них — тонкопесчаная фракция). В природных условиях средне- и мелкопылеватые и глинистые фракции грунта агрегированы, причем значительная часть агрегатов имеет тонкопесчаный размер. Порода не засолена; сухой остаток 0,03%. Естественная влажность ее 27%, степень влажности 0,88, плотность скелета 1,40 г/см<sup>3</sup>, пористость 48%.

Монолит этого грунта также подсушивался на воздухе (как и в предыдущих опытах). При влажностях 2 и 4% (степень влажности 0,09 и 0,18 соответственно) проводилось определение просадочности. Плотность скелета грунта после такого интенсивного подсушивания возросла до 1,61 г/см<sup>3</sup>, пористость снизилась до 40%. Такое значительное уплотнение в процессе дегидратации обусловлено высокопористым составом тонких прослоев линзовидно-слоистого грунта и очень небольшим количеством корней в нем. Некоторые из них были обогащены гумусированными растительными остатками и имели почти черный цвет.

Определение просадочности этих, давших существенную в процессе дегидратации усадку, аллювиальных грунтов показало, что и они стали просадочными под нагрузкой 0,1 и 0,3 МПа. При влажности 2% величина коэффициента относительной просадочности составила 0,013 и 0,034 соответственно.

Эти первые интересные результаты повлекли за собой постановку целой серии экспериментов, в которых принимали участие В.Т. Трофимов, Т.Г. Алексеенко, В.С. Бондаренко, М.Р. Горский, А.В. Ершова, М.И. Яковлев (Трофимов и др., 1986—1991). Описанные ниже данные были получены на шести образцах пылеватых суглинков скрытослоистой микрофации современного аллювия, отобранных с глубины 1,1—2,6 м в пойме р. Оби на участке г. Новосибирск — г. Нижневартовск (Трофимов и др., 1986, 1986а). И в этом случае высоковлажные (20—30%) непросадочные высокопористые (43—50%, табл. 22) суглинки при подсушивании их до низких значений влажности (10% и ниже) по изложенной ранее методике, несмотря на развитие усадки, приобрели отчетливо выраженные просадочные свойства, проявляющиеся при дополнительных нагрузках (табл. 23). Позже такие же результаты были получены А.В. Ершовой (1995—1997) при лабораторных экспериментах на образцах современного пойменного суглинистого аллювия р. Москвы.

Таблица 22

**Состав и свойства аллювиальных грунтов,  
использовавшихся при моделировании**

Образец	Возраст	Суглинок по классификации Н.А. Качинского	Естественная влажность, %	Плотность грунта, г/см <sup>3</sup>	Плотность скелета грунта, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Коэффициент пористости	Степень влажности	Влажность предела пластич- ности, %		Максимальная молекулярная влагоёмкость, %
									верхнего	нижнего	
1	Q <sub>IV</sub>	легкий	20	1,78	1,48	43	0,76	0,69	27	21	15
2	Q <sub>IV</sub>	тяжелый	22	1,75	1,43	45	0,83	0,71	32	23	15
3	Q <sub>IV</sub>	легкий	30	1,73	1,33	49	0,98	0,81	30	25	16
4	Q <sub>IV</sub>	средний	30	1,61	1,24	53	1,14	0,70	26	21	17
5	Q <sub>IV</sub>	тяжелый	30	1,74	1,34	50	1,00	0,80	37	30	19
6	Q <sub>IV</sub>	средний	29	1,71	1,32	50	1,00	0,78	35	23	13

В следующей серии лабораторных экспериментов подсушивание образцов одной и той же аллювиальной породы осуществлялось параллельно на монолитах, одни из которых были лишены внешней нагрузки, а другие находились под ее действием: величина этой дополнительной нагрузки изменялась от 0,01—0,02 МПа (Трофимов, Горский, 1986) до 0,05—0,1 МПа (Ершова, 1995а). В опытах использовались пылеватые средние и тяжелые суглинки, отобранные в поймах Оби и Иртыша, аналогичные по составу и свойствам вышеописанным грунтам. Кроме того, были использованы пылеватые суглинки скрытослоистой микрофации пойменного аллювия, отобранные в разрезе поймы р. Москвы (д. Кулаково и в р-не г. Звенигорода). По составу это средние суглинки, незасоленные (сухой остаток 0,061—0,068), бескарбонатные. Результаты экспериментов свидетельствуют, что в ходе дегидратации породы, находящиеся и под весом только самого образца, и под дополнительной нагрузкой, приобретают просадочные свойства (рис. 32), проявляющиеся только под нагрузками, равными или превышающими те, при которых шла дегидратация образцов. При этом с увеличением действующей нагрузки в процессе сушки пылевой породы значения коэффициента относительной просадочности уменьшаются (рис. 32 и 33). Так, у образцов, отобранных из пойм Оби и Иртыша, просадоч-

Таблица 23

**Результаты определения просадочности  
исходных и подсушенных образцов аллювиальных грунтов**

Об- разец	Влаж- ность, %	Степень влаж- ности	Плот- ность грунта, г/см <sup>3</sup>	Плот- ность скелета грунта, г/см <sup>3</sup>	Порис- тость, %	Коеффи- циент порис- тости	Коеффициент относительной просадочности при нагрузках, МПа		
							природ- ной	0,1	0,3
1	20	0,69	1,78	1,48	43	0,76	0	0	0
	11	0,40	1,68	1,51	42	0,73	0	0	0,013
	7	0,28	1,65	1,54	40	0,69	0	0,010	0,020
	5	0,20	1,64	1,56	40	0,67	0	0,016	0,038
2	22	0,71	1,75	1,43	45	0,83	0	0	0
	20	0,67	1,76	1,47	43	0,78	0	0	0
	16	0,56	1,72	1,48	43	0,77	0	0,007	0,022
	6	0,21	1,60	1,51	42	0,73	0	0,012	0,039
	3	0,12	1,57	1,52	42	0,72	0	0,011	0,044
3	30	0,81	1,73	1,33	49	0,98	0	0	0
	26	0,67	1,63	1,29	51	1,05	0	0,004	0,004
	20	0,56	1,63	1,36	48	0,94	0	0,005	0,011
	10	0,29	1,50	1,36	48	0,94	0	0,007	0,047
	6	0,18	1,49	1,40	46	0,88	0	0,007	0,051
4	30	0,70	1,61	1,24	53	1,14	0	0	0
	17	0,42	1,48	1,26	52	1,10	0	0,005	0,014
	10	0,25	1,42	1,29	51	1,05	0,004	0,013	0,050
	6	0,16	1,40	1,32	50	1,00	0,004	0,017	0,064
5	30	0,80	1,74	1,34	50	1,00	0	0	0
	20	0,55	1,64	1,37	49	0,96	0	0,003	0,016
	2	0,07	1,51	1,48	45	0,84	0	0,006	0,020
6	29	0,78	1,71	1,32	50	1,00	0	0	0
	10	0,28	1,56	1,41	49	0,95	0	—	0,049
	7	0,21	1,56	1,45	47	0,89	0	—	0,020
	4	0,13	1,56	1,50	44	0,78	0	—	0,030

ность проявилась только под нагрузками 0,1 и 0,3 МПа и при значениях влажности меньших 15%. Величина коэффициента относительной просадочности при влажности 10—14% составила 0—0,01 и 0,016—0,02 соответственно; при влажности 4—6% она возросла до 0,011—0,012 и 0,019—0,024. Образцы, отобранные в пойме Москвы, высушенные под нагрузкой 0,05 МПа, проя-

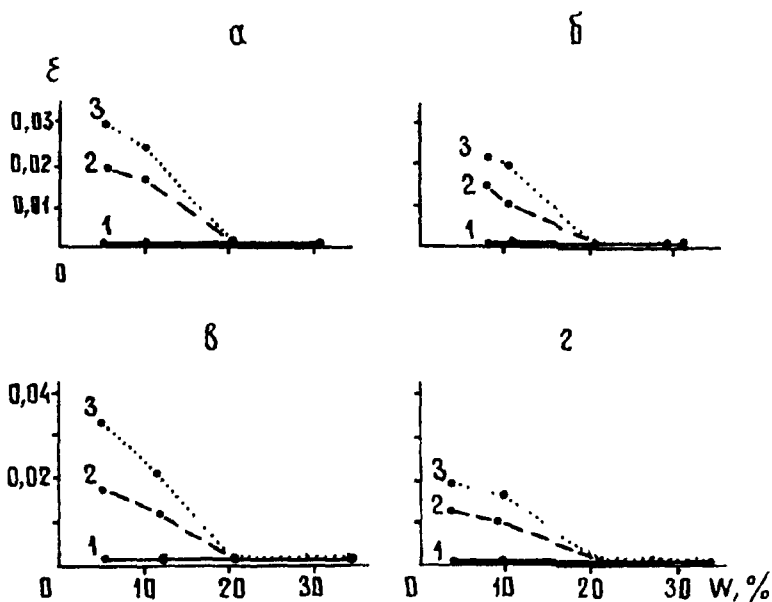


Рис. 32. Зависимость коэффициента относительной просадочности подсушенных при разных условиях пригрузки аллювиальных суглинков от влажности и действующего при замачивании давления (по В.Т. Трофимову и М.Р. Горскому, 1988): а и в — суглинок тяжелый и суглинок средний соответственно подсушивались без какой-либо внешней нагрузки, б и г — образцы-близнецы соответственно, подсушивались при нагрузке 0,01 МПа, кривые 1—3 соответствуют различным давлениям, действовавшим при замачивании образцов (1 — 0,03 МПа, 2 — 0,1 МПа; 3 — 0,3 МПа)

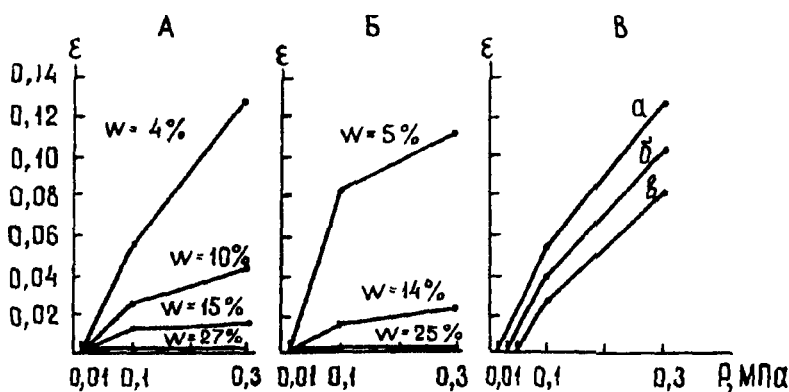


Рис. 33. Зависимость коэффициента относительной просадочности средних аллювиальных суглинков от действующего при замачивании давления  $P$  при разных влажностях: А — для образца 1, Б — для образца 2, В — при разных условиях дегидратации (образец 1): а — без дополнительной нагрузки, б и в — при действии дополнительных нагрузок 0,05 и 0,1 МПа соответственно (по А.В. Ершовой, 1995)

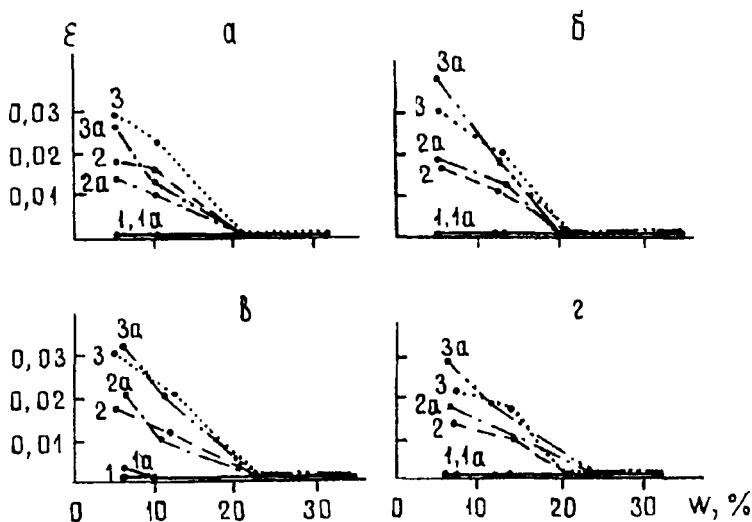


Рис. 34. Зависимость коэффициента относительной просадочности подсушенных на воздухе (1—3 на каждом графике) и под влиянием тока воздуха от вентилятора (1а, 2а, 3а) без какой-либо внешней пригрузки аллювиальных суглинков от влажности и действующего при замачивании давления: а — суглинок тяжелый; б, в и г — образцы-близнецы суглинка среднего; 1, 2 и 3 — см. на рис. 32

вили просадочные свойства при нагрузках 0,05, 0,1 и 0,3 МПа; коэффициент относительной просадочности составил в среднем 0,016, 0,041 и 0,103 соответственно (при влажности 3—5%). Образцы, высушенные под нагрузкой 0,1 МПа, проявили просадку только при нагрузках 0,1 и 0,3 МПа — 0,029 и 0,083 соответственно (при влажности 3—5%).

Следующая серия экспериментов с образцами, аналогичными по исходным составу и свойствам, была посвящена исследованию особенностей формирования просадочности аллювиальных отложений при различной скорости их подсушивания (Трофимов, Горский, 1988). Изменение скорости подсушивания достигалось посредством “прогонки” воздуха с температурой около 20° над поверхностью образцов-монолитов с помощью комнатного вентилятора. Исследуемые образцы размещались на разных расстояниях от вентилятора (0,5, 0,75 и 1 м), что обеспечивало их обдув потоком воздуха разной интенсивности. Такое “ускоренное” подсушивание образцов-монолитов осуществлялось без какой-либо внешней нагрузки и под дополнительной нагрузкой 0,01—0,02 МПа.

Выполненные опыты показали существенное влияние скорости дегидратации аллювиальных пород на величину приобретаемых ими просадочных свойств: с увеличением скорости удаления

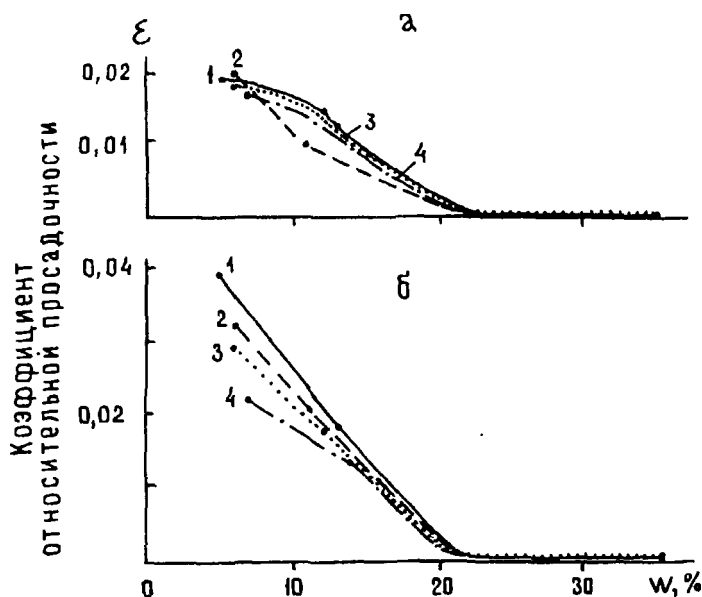


Рис. 35. Зависимость коэффициента относительной просадочности подсушенных с разной скоростью без внешней пригрузки аллювиальных суглинков от влажности при замачивании под давлением 0,1 (а) и 0,3 (б) МПа:

1 — образец 5 (расположен на расстоянии 0,5 м от вентилятора); 2 — образец 6 (то же, 0,75 м); 3 — образец 7 (то же, 1 м); 4 — образец 7 (подсушен на воздухе без воздействия вентилятора). Образцы 5, 6 и 7 — образцы-близнецы суглинка среднего (исходная естественная влажность 35%, пористость 49–52%)

воды из породы отмечается, как правило, увеличение значений коэффициента относительной просадочности, причем чем выше нагрузка, при которой определялась просадочность, тем рельефнее проявляется эта тенденция (рис. 34, 35). Как и в экспериментах с подсушиванием образцов без обдува воздухом, формирование просадочности здесь происходит и под действием дополнительной нагрузки.

Полученные данные объясняются тем, что увеличение скорости дегидратации пород, исходя из существующих теоретических представлений и экспериментальных данных для паст и глинистых грунтов, должно сопровождаться уменьшением величины деформации усадки. Это соответственно ведет к меньшему снижению пористости аллювиальных пород в процессе ускоренной сушки и возрастанию величины коэффициента относительной просадочности. Такое возрастание этого показателя, учитывая пылеватый состав, высокую агрегированность глинистых частиц и особенности строения (скелетное, высокопористое) пород, использованных в экспериментах, должно быть небольшим по ве-

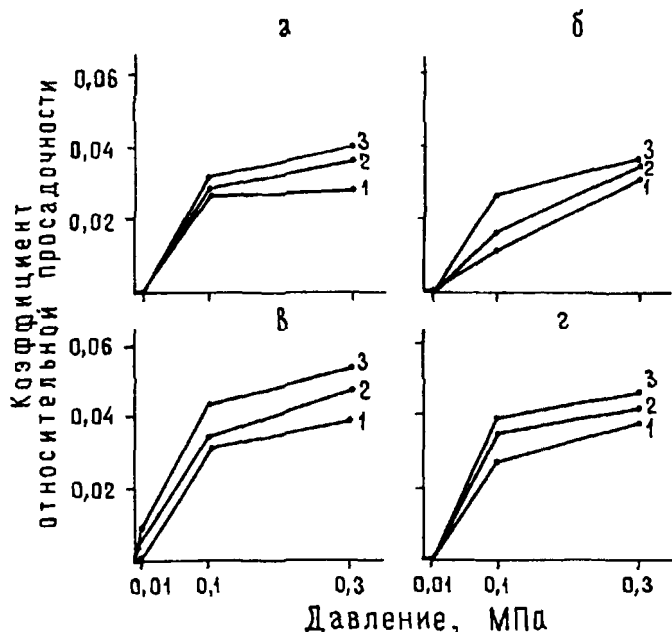


Рис. 36. Зависимость коэффициента относительной просадочности среднего аллювиального суглинка (образец 2) с влажностью 12–15 (а, б) и 5–7% (в, г) при нагрузках 0,01, 0,1 и 0,3 МПа от температуры подсушивания при действии собственного веса образца (а, в) и дополнительной пригрузки 0,01 МПа (б, г): 1–3 — температура при подсушивании породы (1 — 20, 2 — 40/20, 3 — 60/20°)

личине, что и подтверждают приведенные выше сведения. Возможно именно этим, по мнению авторов, объясняется более высокая просадочность, проявляющаяся обычно при дополнительных нагрузках, у аллювиальных отложений надпойменных террас аридных районов по сравнению с аналогичными образованиями, развитыми в более северных широтах.

Изучение влияния скорости дегидратации пылеватых пород на формирование их просадочных свойств, а также материалы Н.И. Кригера (1981, 1986), на основании которых он сделал вывод о связи просадочности лёссовых пород с величиной радиационного баланса и радиационного индекса сухости, привели к необходимости исследования влияния температуры на поверхности почвы на величину формируемой просадочности лёссовых пород. Первые такие данные приведены в работах В.Т. Трофимова, Т.Г. Алексеенко и Л.Р. Васильевой, Е.Ю. Куликовой (1991), В.Т. Трофимова и А.В. Ершовой (1991). Эти эксперименты также проводились на образцах-монолитах современных аллювиальных образований скрытослоистой микрофации



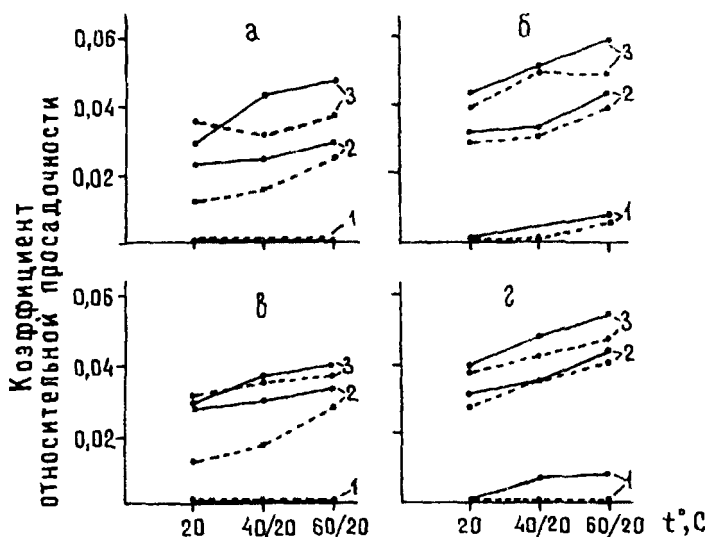


Рис. 37. Зависимость коэффициента относительной просадочности среднего аллювиального суглинка (а, б — образец 1; в, г — образец 2) при влажности 12—15 (а, в) и 5—8% (б, г) от температуры их дегидратации: 1—3 — изменение коэффициента относительной просадочности при замачивании под нагрузкой 0,01 (1), 0,1 (2), 0,3 (3) МПа. Сплошная линия соответствует образцам, подсушенным только при действии их собственного веса, пунктирная — при дополнительной нагрузке 0,01 МПа

пойменного аллювия, отобранных в разрезе поймы Оби близ устья Иртыша. По составу это тяжелые и средние лёссовидные суглинки, незасоленные (сухой остаток 0,05—0,07%), содержание карбонатов до 0,02%. Естественная влажность суглинков составляла 25—28%, пористость 50%.

Работы включали несколько серий экспериментов: 1) высушивание образцов-монолитов на воздухе при комнатной температуре (20°) без какой-либо внешней нагрузки на образец; 2) то же при действии на образец дополнительной внешней нагрузки 0,01 МПа, близкой по величине к природной нагрузке; 3) высушивание образцов-монолитов с большей скоростью путем создания более высокой температуры на их поверхности (25, 40 и 60°); 4) то же при действии дополнительной нагрузки 0,01 МПа.

Подсушивание грунтов осуществлялось через верхнюю поверхность запарафинированных монолитных образцов с помощью нагрева электрической лампой в течение 8—10 ч. В остальное время суток (всего 7—10 сут) температура составляла около 20°. Результаты экспериментов доказывают существенное влияние температуры на поверхности подсушиваемого образца на величину формируемой просадочности (рис. 36, 37). Коэффициенты

относительной просадочности образцов, дегидратированных при температуре на поверхности 60/20°, почти в 1,2 раза выше, чем при температуре 40/20°, а они в свою очередь выше, чем у подсыхающих при температуре 25/20°, причем это наблюдается как при действии дополнительной нагрузки, так и без

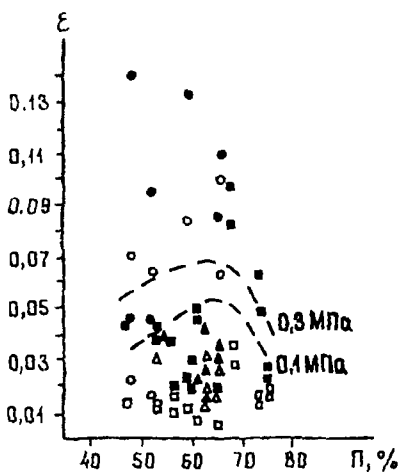
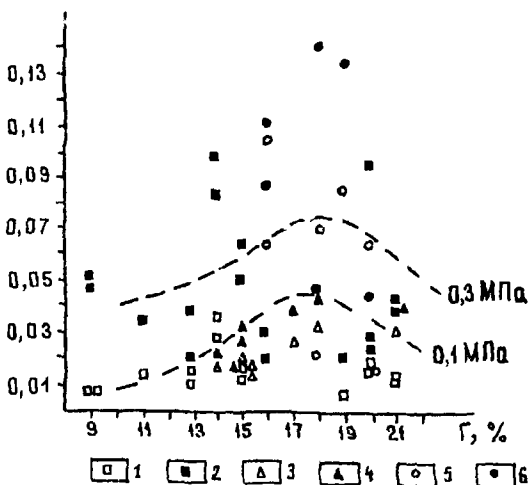


Рис. 38. Зависимость величины, формирующейся при дегидратации просадочности аллювиальных суплинков, от содержания пылеватой (П, %) и глинистой (Г, %) фракций при давлениях 0,1 (1, 3, 5) и 0,3 (2, 4, 6) МПа. Местоположение разрезов, из которых отобраны образцы-монолиты для экспериментов: 1, 2 — долина Оби в среднем течении; 3, 4 — долина Иртыша в нижнем течении; 5, 6 — долина р. Москвы в верхнем течении (по А.В. Ершовой, 1997)



нее. Более того, по данным нашим и А.В. Ершовой (Трофимов, Ершова, 1991), при высокой температуре (40°) на поверхности образца формируется просадочность, проявляющаяся при замачивании под очень небольшим давлением (0,01 МПа). Такой же результат был получен при подсушивании образцов, находящихся под дополнительной нагрузкой (0,01 МПа), при температуре 60/20°.

Более интенсивная просадочность лёссовых пород, формирующаяся при воздействии более высоких температур (при этом общая пористость подсушенных при разных температурах пылеватых пород оказалась близкой) обусловлена различием микростроения пород, возникающим при дегидратации сильно увлаж-

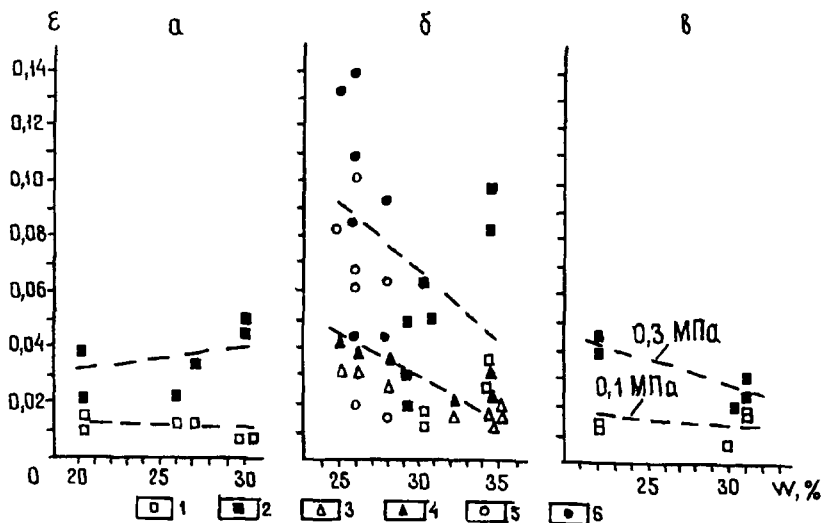


Рис. 39. Зависимость величины формирующейся при дегидратации просадочности  $\varepsilon$  аллювиальных суглинков от исходной влажности  $W$ :

а — выборка, включающая легкие суглинки, б — средние суглинки, в — тяжелые суглинки, давление при замачивании 0,1 (1, 3, 5) и 0,3 (2, 4, 6) МПа. Условные обозначения 1—6 см на рис 38 (по А.В. Ершовой, 1997)

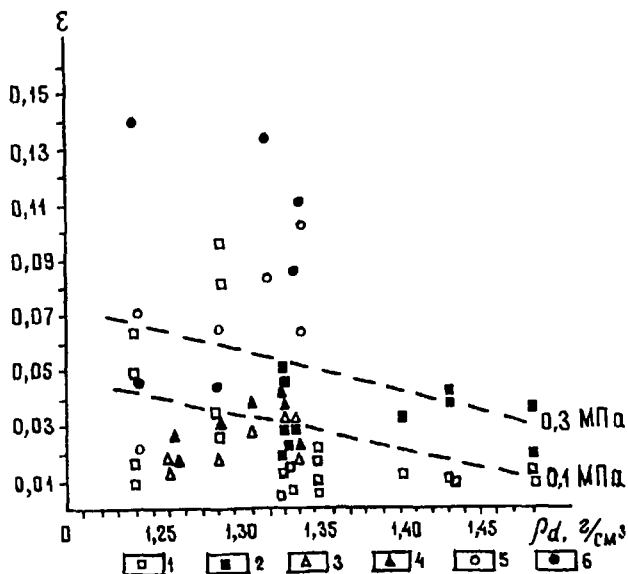


Рис. 40. Зависимость величины формирующейся при дегидратации просадочности  $\varepsilon$  аллювиальных суглинков от исходной плотности скелета грунта при давлениях 0,1 (1, 3, 5) и 0,3 (2, 4, 6) МПа. Условные обозначения 1—6 см. на рис. 38 (по А.В. Ершовой, 1997)

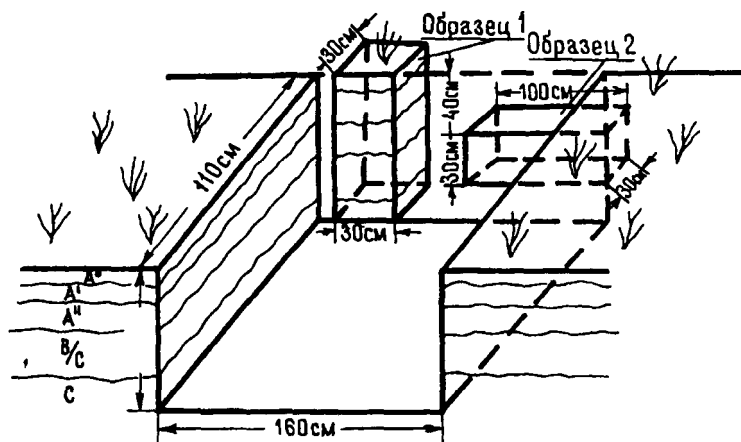


Рис. 41. Схема отбора больших монолитов-образцов

ненных осадков и молодых пород при одинаковых температурах на поверхности толщи (Трофимов, Ершова, 1991). Подобная картина, как отмечалось ранее, наблюдалась и при ускоренном подсушивании образцов за счет обдува их вентилятором. Это явление в случае дальнейшего экспериментального подтверждения может объяснить формирование просадочности аллювиальных пород, проявляющейся при природном давлении, не прибегая к привлечению каких-либо иных причин (например, гипергенного разуплотнения таких пород).

Обобщение всех данных лабораторных экспериментов о формировании эпигенетической просадочности аллювиальных пылеватых пород выполнено в 1997 г. в диссертационной работе А.В. Ершовой. Наряду с подтверждением многих описанных зависимостей ею убедительно показано влияние состава и свойств исходных сильно увлажненных пород на величину формирующейся просадочности. В частности, А.В. Ершова (1997) оценила в этом плане роль содержания пылевой и глинистой фракций (рис. 38), исходной естественной влажности (рис. 39) и исходной плотности скелета (рис. 40) аллювиальных пылеватых пород.

Все эти материалы показали влияние на величину формируемой просадочности как “собственных” особенностей исходных аллювиальных пород (гранулометрического состава, естественной влажности, пористости и др.), так и условий их дегидратации (скорости дегидратации, величины нагрузки на образец, при которой она происходит, и др.). В то же время эти эксперименты поставили вопрос о масштабном факторе, о применимости полученных данных не только к элементарному слою аллювиаль-

ных пород, но и их толщи. Ответ на эти вопросы был получен в ходе экспериментов, проведенных на "больших монолитах" размером  $30 \times 30 \times 100$  см. Программа таких работ была разработана автором данной книги, ее практическая реализация выполнена А.В. Ершовой.

Образцы-монолиты современных аллювиальных отложений указанного размера отобраны в разрезе поймы на правом берегу р. Москвы в районе д. Кулаково, в 30 км ниже по течению от г. Москвы. Схема отбора образцов представлена на рис. 41. Образец 1 отобран с глубины 0,0—1,0 м, образец 2 — 0,4—0,7 м (длинная ось монолита ориентирована горизонтально). Они являются образованиями скрытослоистой (по Е.В. Шанцеру) микрофации пойменного аллювия. Видимая мощность отложений над урезом воды составляет около 4 м.

В этом месте в обнажении вскрыт следующий разрез:

- 0,00—0,06 м — дернина темно-бурая, плотноватая.
- 0,06—0,25 м — суглинок пылеватый средний буровато-серый зернисто-комковатый, пронизан корнями трав, рыхлый, с ходами червей (диаметр до 0,5 см). Встречаются окатанный гравий размером до 0,6—1,0 см. Слоистости не видно.
- 0,25—0,45 м — то же, более ожелезнен. Отмечено большое количество следов ходов червей, преимущественно вертикально ориентированных, на  $100 \text{ см}^2$  от 5—6 до 15 ходов (диаметр 0,8—1,0 см).
- 0,45—0,70 м — суглинок тот же, более темный, местами ожелезнен. Присутствуют следы ходов червей такого же размера, но в меньшем количестве.
- 0,70—1,00 м — суглинок темно-серый с палевым оттенком.
- 1,00—1,30 м — суглинок тяжелый гумусированный ожелезненный с оскольчатой структурой.
- 1,30—1,70 м — суглинок ожелезненный комковатый.
- 1,70—1,90 м — суглинок черно-серый тяжелый гумусированный ожелезненный.
- 1,90—2,60 м — суглинок тяжелый ожелезненный с ортштейнами и пятнами пылеватого песка серого света.
- 2,60—3,15 м — суглинок темно-серый гумусированный ожелезненный.
- 3,15—4,00 м — суглинок тяжелый серо-коричневый, местами сильно-ожелезненный, в нижней части с прослоями песка мелкого и пылеватого, мощность прослоев от 1—2 до 5—10 см.

Верхние пять слоев являются соответственно горизонтами  $A^0$ ,  $A^I$ ,  $A^{II}$ , В/С и С дерновой почвы. В пристеночной части обнажения (на глубину до 30—40 см) верхи толщи разбиты вертикальными трещинами на столбчатые отдельности шириной 50—70 см. В грунте отмечено много корней и неравномерно

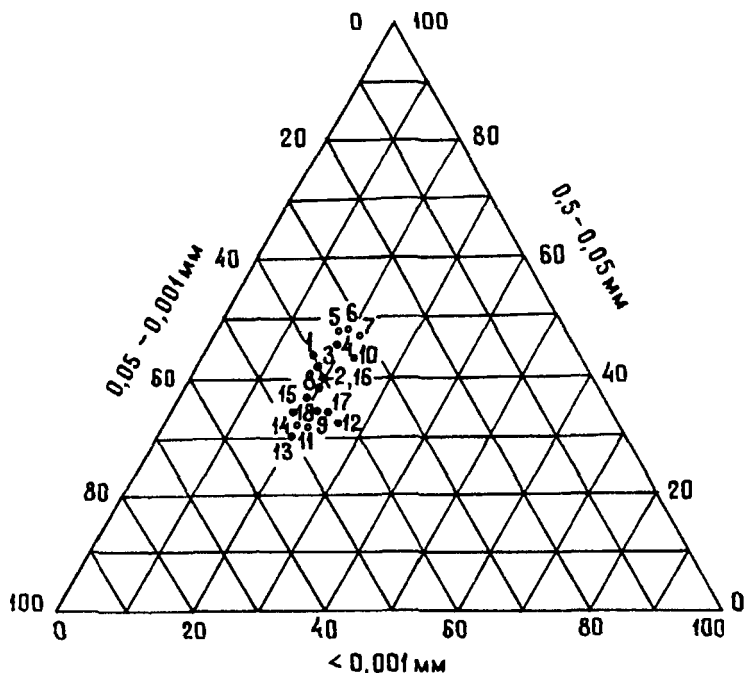


Рис. 42. Гранулометрический состав проб пород образца-монолита 1, отобранных на разной глубине. Проба 1 отобрана в интервале 0,10–0,15 м, проба 2 — 0,15–0,20 м и т.д.; проба 18 — в интервале 0,95–1,00 м

распределенных по площади макропор (диаметром до 2–3 мм) вертикального направления.

Гранулометрический анализ, проведенный с использованием в качестве диспергатора пирофосфата натрия, показал, что монолиты сложены средними лёссовидными суглинками по классификации С.С. Морозова (преимущественно средними и в отдельных горизонтах тяжелыми суглинками, по классификации Н.А. Качинского). В их составе содержится 30–48% частиц крупнее 0,05 мм; 17–25% частиц размером менее 0,001 мм; частиц < 0,01 мм — 24–46%, пылеватых (0,05–0,001 мм) — 31–50, из них крупнопылеватых (0,05–0,01 мм) 19–30% (рис. 42). В естественных условиях тонкодисперсная составляющая пород агрегирована: выход глинистых частиц При микроагрегатном анализе составляет 2–11%.

Основными пороодообразующими компонентами являются минералы легкой фракции: кварц (67–83% всей породы) и полевые шпаты (7–24%). Глинистые минералы представлены преимущественно смешанослойными (26–42%) и гидрослюдой (41–55%).

Результаты изучения водной вытяжки показали, что рассматриваемые аллювиальные суглинки относятся к незасоленным — величина сухого остатка водной вытяжки изменяется от 0,067 до 0,109%, pH 7,2 до 8,2. Содержание гумуса (по массе) уменьшается вниз по разрезу с 3,5 (0,05 м) до 0,99% (0,85 м).

В естественном залегании отмечено некоторое увеличение влажности пород с глубиной: от 30—31 (0,15 м) до 36—37% (1,0 м). Какой-либо закономерности в распределении плотности с глубиной не отмечено, ее величина изменяется от 1,56 до 1,64 г/см<sup>3</sup>, среднее значение составляет 1,60 г/см<sup>3</sup>; пористость колеблется от 54 до 57%, чаще всего близка к 55%. Влажность верхнего предела пластичности изменяется от 40 до 42%, нижнего — от 30 до 33%, влажность максимальной молекулярной влагоемкости 8—19%, влажность завядания ( $W_z = 1,5W_{\text{мг}}$ ) — 14, влажность максимальной гигроскопичности 9, гигроскопическая влажность 3,5%.

В полевых условиях специально были отобраны параллельные образцы грунта естественной влажности с различных интервалов для определения просадочных свойств. Как и предполагалось, образцы оказались непросадочными при всех приложенных нагрузках: природной, 0,05, 0,1 и 0,3 МПа.

В полевых условиях образцы-монолиты размером 30 × 30 × 100 см были полностью запарафинированы и помещены в деревянные короба. Небольшие пустоты между стенкой короба и стенками монолита были засыпаны песком. Это исключило возможность повреждения монолитности образцов при транспортировке и в процессе эксперимента.

В лабораторных условиях образцы-монолиты вскрывались сверху и подсушивались на воздухе через верхнюю поверхность при температуре около 20°; марлево-парафиновый изоляционный слой снизу и с боков оставляли. Образец 1 подсушивался при действии только веса самого образца, а образец 2 — под действием дополнительной внешней пригрузки величиной 0,02 МПа (что соответствовало бы весу вышележащей толщи мощностью 1,25 м при средней плотности грунта 1,60 г/см<sup>3</sup>). Для передачи нагрузки на образец верхнюю поверхность грунта закрывали перфорированным двухслойным поршнем, на который устанавливали груз. Перфорация и двухслойность поршня обеспечивали уменьшение влажности породы (Трофимов, Горский, 1988).

В процессе эксперимента регулярно проводились замеры влажности образцов. Для этого в коробах было проделано несколько отверстий (на отметках 0,15, 0,30, 0,50, 0,75 м), через которые с помощью специального пробоотборника из монолитов брали пробы грунта для определения влажности весовым способом.

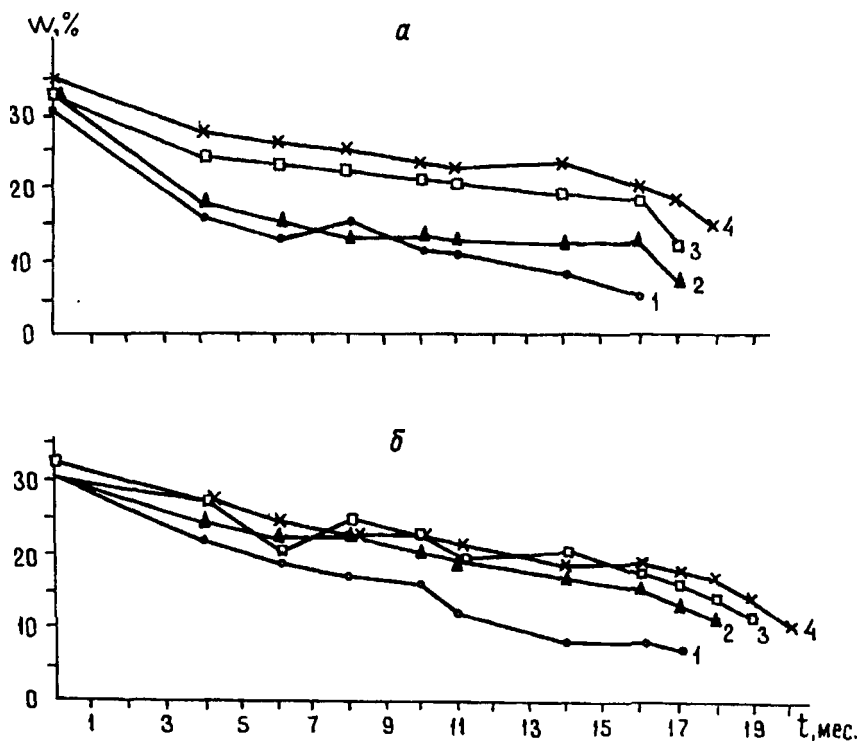


Рис. 43. Динамика изменения влажности образцов 1 (а) и 2 (б) при подсушивании: 1 — глубина 0,15 м; 2 — 0,3 м; 3 — 0,5 м; 4 — 0,75 м

На время между взятием проб отверстия закрывались пробками из полиэтилена, что исключало влагообмен образцов с окружающей средой. Определение просадочных свойств образцов начали, когда влажность в их верхнем слое (отметка 0,15 м) достигла 5—7%. Эксперимент продолжался 18 (образец 1) и 20 (образец 2) месяцев. Длительность модельного опыта обусловлена медленным снижением влажности аллювиальной “толщи” через ее верхнюю поверхность (рис. 43). В целом таким образом моделировался переход элементарного слоя аллювиальных отложений из разреза поймы в обстановку I надпойменной террасы в условиях сухого климата — дегидратация (изменение термовлажностных условий при положительной температуре).

Из верхней части монолитов отбирали по 4—6 колец грунта стандартного размера для определения просадочных свойств методом одной кривой в компрессионном приборе конструкции ЦНИИ МПС при нагрузках природной, 0,05, 0,1 и 0,3 МПа. В процессе проведения эксперимента велись наблюдения за за-



вершением консолидации образцов при данной нагрузке, после чего проводилось их замачивание снизу. Величина природной нагрузки изменялась по высоте образца, увеличиваясь сверху вниз. Для образца 1 ее рассчитывали по формуле  $P = \rho h$ , МПа, для образца 2 —  $P = \rho h + 0,02$ , МПа, где  $\rho = 1,6$  г/см<sup>3</sup>,  $h$  — глубина, м. По мере “отработки” монолита вес вышележащей толщи компенсировался дополнительной нагрузкой, соизмеримой со снимаемой (природной).

Постоянно действующая нагрузка в 0,02 МПа отождествлялась с нагрузкой перекрывающей аллювий толщи субэвразального генезиса (мощностью 1,25 м) или нагрузкой за счет возведения сооружения. Таким образом моделировалось формирование просадочности при дегидратации элементарных слоев аллювиальных пылеватых пород, залегающих на глубинах от 1,25 до 2,25 м.

Физическое лабораторное моделирование на образцах 1 и 2, учитывая особенности строения и состава изучаемых “аллювиальных толщ” мощностью 1,0 и 2,25 м соответственно, позволит показать распределение величины коэффициента относительной просадочности по “разрезу” образцов при различных нагрузках. Поскольку образец 2 в силу специфики его отбора является более однородным, то следует ожидать более однородные данные о величине формируемой при дегидратации просадочности толщи.

Для определения просадочных свойств верхние 0,15 м образца 1 не испытывались ввиду сильного их изменения процессами почвообразования. Образец 2 был использован полностью. Поскольку в каждом монолите просадочность определяли на 17 (образец 1) и 14 (образец 2) уровнях при четырех нагрузках, то было сделано 132 определения просадочности. Полученные данные приведены в табл. 24 и 25. Главный их итог: в процессе дегидратации исходных сильно увлажненных высокопористых аллювиальных пород поймы сохраняется высокопористая структура пород, и они приобретают четко выраженные просадочные свойства, которые проявляются главным образом при дополнительных нагрузках.

Дегидратация образца-монолита 1 происходила при действии собственного веса пород. Эта нагрузка изменялась от 0,0032 МПа на глубине 20 см до 0,016 МПа на глубине 1 м. При действии только этой нагрузки при замачивании большая часть проб дегидратированных образцов оказалась непросадочной. Ряд проб при замачивании проявил набухание (см. табл. 24). При нагрузке 0,05 мПа величина коэффициента относительной просадочности составила 0,005—0,112; при нагрузках 0,1 и 0,3 МПа его значение возросло до 0,006—0,129 и 0,022—0,169 соответственно.

Таблица 24

Влажность, свойства и результаты определения просадочности образца 1

Глубина, м	Влажность, %	Степень влажности	Плотность, г/см <sup>3</sup>		Пористость, %	Кoeffи- циент пористости	$R_{пр} \cdot 10^{-4}$ , МПа	Кoeffициент относительной просадочности при нагрузках, МПа			
			грунта	скелета грунта				природной	0,05	0,1	0,3
0,15—0,20	4	0,12	1,45	1,39	48	0,94	32	0,018	0,017	0,042	0,058
0,20—0,25	4	0,10	1,40	1,35	50	0,99	40	0,002	0,023	0,036	0,057
0,25—0,30	7	0,26	1,48	1,29	52	0,76	48	0	0,012	0,027	0,084
0,30—0,35	7	0,20	1,47	1,37	49	0,96	56	0,001	0,018	0,042	0,056
0,35—0,40	7	0,20	1,47	1,37	49	0,96	64	0,003	0,031	0,065	0,116
0,40—0,45	9	0,23	1,44	1,32	51	1,04	72	-0,0005	0,012	0,018	0,046
0,45—0,50	12	0,28	1,43	1,28	52	1,10	80	0	0,021	0,026	0,102
0,50—0,55	11	0,21	1,32	1,16	57	1,32	88	-0,001	0,034	0,052	0,019
0,55—0,60	11	0,24	1,35	1,22	55	1,20	96	-0,002	0,017	0,042	0,139
0,60—0,65	13	0,29	1,37	1,21	55	1,22	104	0,030	0,042	0,006	0,132
0,65—0,70	11	0,23	1,32	1,19	56	1,26	112	0,027	0,112	0,087	0,150
0,70—0,75	14	0,30	1,37	1,20	55	1,24	120	0,014	0,027	0,097	0,022
0,75—0,80	10	0,22	1,34	1,22	55	1,20	128	0,006	0,095	0,121	0,057
0,80—0,85	7	0,17	1,34	1,25	54	1,15	136	0,023	0,054	0,129	0,114
0,85—0,90	7	0,16	1,34	1,26	53	1,13	144	0,001	0,092	0,025	0,122
0,90—0,95	7	0,21	1,33	1,25	54	1,15	152	0,005	0,005	0,101	0,113
0,95—1,00	9	0,21	1,37	1,26	53	1,13	160	0,001	0,040	0,069	0,169

Таблица 25

Влажность, свойства и результаты определения прочности образца 2

Глубина, м	Влажность, %	Степень влажности	Плотность, г/см <sup>3</sup>		Пористость, %	Коэффициент пористости	$P_{np} \cdot 10^{-4}$ , МПа	Коэффициент относительной прочности при нагрузках, МПа		
			грунта	скалы грунта				природной	0,05	0,1 0,3
0,00—0,10	4	0,11	1,38	1,32	51	1,04	216	0	0,005	0,046 0,083
0,10—0,15	7	0,18	1,38	1,29	52	1,08	224	0,001	0,019	0,015 0,052
0,15—0,25	7	0,18	1,38	1,29	52	1,08	240	0,007	0,012	0,093 0,095
0,25—0,35	12	0,32	1,40	1,25	54	1,17	256	0,016	0,051	0,018 0,068
0,35—0,40	11	0,25	1,39	1,26	53	1,13	264	0,003	0,024	0,066 0,035
0,40—0,45	11	0,28	1,47	1,32	51	1,04	272	0,003	0,015	0,005 0,044
0,45—0,55	13	0,33	1,49	1,32	51	1,04	280	0	0,012	0,046 0,054
0,55—0,65	11	0,26	1,41	1,27	53	1,12	296	0,016	0,003	0,083 0,061
0,65—0,75	12	0,33	1,40	1,25	54	1,17	320	0,005	0,028	0,060 0,050
0,75—0,80	10	0,26	1,37	1,25	54	1,17	328	0,023	0,018	0,041 0,121
0,80—0,85	11	0,24	1,34	1,21	55	1,22	336	0,009	0,078	0,095 0,107
0,85—0,90	13	0,34	1,41	1,25	54	1,17	344	0,026	0	0,016 0,013
0,90—0,95	12	0,29	1,39	1,24	54	1,17	352	0,020	0,013	0,085 0,084
0,95—1,00	13	0,31	1,40	1,24	54	1,17	360	0,010	0,027	0,002 0,078

Наибольшие величины коэффициента относительной просадочности отмечены для образцов с влажностью менее 9%, пористостью более 53%, плотностью скелета грунта 1,19—1,26 г/см<sup>3</sup>.

Подчеркнем, что отсутствие просадочных свойств при действии только природной нагрузки или проявление набухания — явления, полностью согласующиеся с теоретическими основаниями дегидратационно-доуплотнительного механизма формирования просадочности аллювиальных пород. Наличие просадочных свойств у ряда проб из этого монолитного образца не увязывается с этими положениями и скорее всего обусловлено структурными особенностями грунта — наличием крупных вертикальных макропор именно в этих пробах. Об этом же свидетельствуют очень высокие значения коэффициента относительной просадочности при больших нагрузках у проб, отобранных именно с этих же уровней образца-монолита (табл. 24).

Дегидратация образца-монолита под дополнительной нагрузкой дала принципиально такой же результат — сформировались просадочные аллювиальные породы, но величина коэффициента относительной просадочности имеет меньший диапазон изменения (табл. 25). При природной нагрузке, изменяющейся от 0,0216 до 0,036 МПа, значения коэффициента относительной просадочности составляли 0—0,035 (у большей части образцов 0—0,01); набухание образцов не проявилось ни разу. При увеличении нагрузки коэффициент относительной просадочности возрастает и изменяется при нагрузке 0,05 МПа от 0 до 0,078, 0,1 МПа — от 0,002 до 0,095, 0,3 МПа — от 0,013 до 0,121. Наибольшие величины коэффициента относительной просадочности отмечены у образцов с влажностью менее 11%, пористостью более 52%, плотностью скелета грунта 1,23—1,29 г/см<sup>3</sup>.

Следует подчеркнуть, что величина коэффициента относительной просадочности у дегидратированных образцов колеблется в достаточно широком диапазоне. Это обусловлено, как уже отмечалось, структурной неоднородностью исходных образцов, и в частности наличием и неоднородным распределением крупных вертикально ориентированных макропор. Более однородный образец 2 характеризуется меньшим диапазоном изменения величины коэффициента относительной просадочности при равных давлениях.

Этим исследованием автор данной работы и А.В. Ершова впервые экспериментально в лабораторных условиях на образцах-монолитах большого размера показали возможность формирования просадочности только в ходе дегидратации изначально сильно увлажненных высокопористых аллювиальных пылеватых пород. Закономерности формирования просадочности у таких

аллювиальных пород при дегидратации, полученные в более ранних работах на образцах-монолитах небольшого размера, прослеживаются и на образцах-монолитах большого размера (возможность формирования эпигенетической просадочности у образцов в ходе дегидратации при положительной температуре как под действием дополнительной внешней нагрузки, так и без нее, только при действии веса самого образца; величины коэффициентов относительной просадочности у образца, подсушенного под нагрузкой, имеют как меньшие величины, так и меньший диапазон изменения и др.). Этим доказано, что дегидратационно-доуплотнительный механизм формирования просадочности аллювиальных пылеватых пород и элементарного слоя грунта и их толщи является работающим.

Таким образом, многочисленными лабораторными экспериментами показано, что: 1) при дегидратации высокопористых аллювиальных пылеватых отложений пойменной фации формируется просадочность, эпигенетическая по своей природе; 2) просадочность формируется, когда на подсыхающую породу действуют и ничтожное малое давление (вес пород элементарного слоя), и более высокие природные и дополнительные нагрузки; при этом величина просадочности уменьшается с ростом действующей при дегидратации нагрузки; 3) увеличение скорости дегидратации пород (обдув ветровым потоком, повышение температуры на поверхности) обуславливает приобретение ими больших значений коэффициента относительной просадочности; 4) просадочные свойства во всех подсушенных образцах (за единичными исключениями, что требует дальнейшего экспериментального подтверждения) проявляются только при дополнительных нагрузках.

Моделирование формирования эпигенетической просадочности *в массиве в природной обстановке* дало различные результаты. "Первый опыт проводился на высокой пойме р. Амударьи в районе пос. Саят Чарджоуской области силами Южно-Каракумской гидрогеологической экспедиции в течение пятимесячных откачек при понижении уровня вод на 8 м. После осушения и высыхания в течение жаркого лета аллювиальные пойменные отложения уплотнились при усадке; в них отсутствовала просадочность при природной нагрузке и при давлении 0,1 МПа" (Минервин, 1982а).

Второй опыт проведен на высокой пойме р. Оби в Новосибирской области в течение 9-месячных групповых откачек с понижением уровня грунтовых вод на 6 м из пойменных лёссовидных суглинков скрытослоистой фации аллювия. Здесь после осушения аллювиальной толщи, ее сезонного промерзания и

“иссушения после жарких летних месяцев” (Минервин, 1982а) сформировались просадочные лёссовые породы (коэффициент относительной просадочности при бытовой нагрузке составил до 2,5%, при нагрузке 0,3 МПа — до 7%).

Практически все эти экспериментальные данные подтверждают гипотезы Н.Я. Денисова в приложении к элементарному объему аллювиальных суглинков. Кроме того, в пользу этой схемы говорит и такой широко известный факт: в разрезах надпойменных террас, сложенных субаквальными (аллювиальными, озерно-аллювиальными) отложениями, широко развиты грунты, не проявляющие просадочных свойств при действии природной нагрузки, но обладающие четко выраженной способностью резко доуплотняться при увлажнении под более высокими нагрузками. Характерно, что такие породы залегают не только в верхней части разреза толщи, что может быть объяснено гипергенным их разуплотнением, но и на значительных глубинах. Сооружения, возведенные на таких лёссовых грунтах, могут в течение длительного периода при сохранении невысокой влажности пород работать нормально, испытывая лишь небольшие осадки. После же значительного увеличения влажности эти сооружения испытывают существенные деформации вследствие доуплотнения лёссовых пород.

## 4.2.

### **Экспериментальные данные о формировании эпигенетической просадочности лёссовых пород различного генезиса и возраста в соответствии с гипергенно- дегидратационно-разуплотнительной гипотезой**

В доказательство работы этой гипотезы имеются и косвенные и прямые лабораторные и природные (в массиве) экспериментальные данные. Последние имеют уникальное значение.

Среди *косвенных* данных, свидетельствующих о возможности формирования просадочности лёссовых пород, приведем три широко известных позиции. Первая из них выражается в широком покровном залегании просадочных лёссовых пород в разрезах разных геоморфологических элементов (междуречных равнин, надпойменных террас, пролювиальных шлейфов, склонов и др.), сложенных различными по генезису породами (включая аллювиальные, озерно-аллювиальные, водно-ледниковые, ледниковые). В подавляющей части этих разрезов отмечено закономерное (часто скачкообразное) уменьшение коэффициента относительной просадочности вниз по разрезу, начиная непосредственно от

современных подпочвенных горизонтов, причем не только при дополнительных нагрузках, но и часто под природной нагрузкой. Наличие лёссовых пород последнего типа, залегающих в верхней части разреза аллювиальных, озерно-аллювиальных и водно-ледниковых толщ, не может быть объяснено ни одной из гипотез Н.Я. Денисова. Этот факт свидетельствует, что водные осадки уже после их превращения в горную породу нормальной уплотненности оказались разуплотненными по отношению к природной нагрузке. Современные условия залегания этих пород приводят к выводу, что это разуплотнение гипергенное, а просадочность пород эпигенетическая.

Вторая позиция выражается в широком распространении лёссовых пород с циклическим распределением величины просадочности по разрезу в толщах сложного строения, содержащих погребенные горизонты. Такие толщи развиты во многих районах распространения лёссовых пород (Болгария, Молдавия, Украина, Предкавказье, Н. Прикамье, Средняя Азия, юг Сибири), и одним из наиболее часто встречающихся их типов являются разрезы, в которых просадочность в пределах каждого седиментационного комплекса (циклита) наибольшая непосредственно под современной или погребенной почвой, и вниз по толще комплекса она закономерно убывает (см. раздел 1.6). Наличие такой картины позволило А.В. Минервину и Е.М. Сергееву (1964), в частности, для разрезов лёссовых пород аллювиального генезиса Сибири предположить, что просадочность является результатом разуплотнения лёссовых пород под влиянием выветривания.

Было также установлено наличие разрезов, в которых наибольшая величина просадочности характерна для пород второго комплекса, а так же разрезов, в которых величины коэффициента относительной просадочности и их распределение по толще первого и второго седиментационных комплексов лёссовых пород близки между собой (рис. 11, 12). И в этих разрезах под горизонтами современных и погребенных почв залегают, как правило, более просадочные породы и при природной нагрузке, и при давлении 0,3 МПа. Вышеописанный ход кривых в разрезах пролювиальных и делювиально-пролювиальных отложений ташкентского комплекса позволил Х.Л. Рахматуллаеву (1977) также сделать вывод, что повышенная просадочность этих образований под почвенными горизонтами является результатом их разуплотнения под воздействием гипергенных процессов в этапы перерывов в осадконакоплении.

Нами (Трофимов, 1986) по последней интерпретации было отмечено, что захоронение и сохранение таких просадочных лёссовых пород при последующем возобновлении пролювиально-

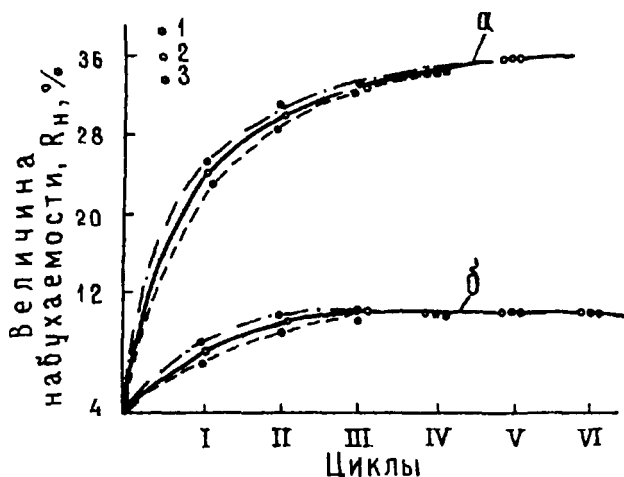


Рис. 44 Зависимость величины набухаемости лессов из р-на г Буденновска от количества циклов увлажнения и высушивания

а — непросадочный лёсс с глубины 97,5 м, б — просадочный лёсс с глубины 6,3 м, 1 и 2 — набухание в ненарушенном слоении в направлении, параллельном и перпендикулярном напластованию, 3 — набухание в нарушенном слоении

го или делювиального осадконакопления в условиях жаркого климата может быть объяснено исходя из положений гипотезы формирования сингенетической просадочности Н.Я. Денисова. Но даже если это так, то в целом эти толщи имеют сложный генезис просадочности — преимущественно сингенетический в нижней и средней частях каждого седиментационного комплекса и сингенетически-эпигенетический в верхней его части, под почвенным горизонтом, где произошло значительное усиление первичной просадочности за счет гипергенных процессов.

Важное значение имеет и третий момент: гипергенным разуплотнением логично объясняется развитие наиболее просадочных лёссовых пород на присклоновых участках различных геоморфологических элементов, сложенных аллювиальными, озерно-аллювиальными и даже ледниковыми отложениями. Именно здесь при прочих равных условиях наиболее активно протекает дегидратация толщ, их агрегация, термическое разуплотнение.

Существует достаточно много экспериментальных доказательств «работы» гипергенеза, полученных в лабораторных условиях. Так, Н.В. Коломийцевым, Н.Н. Комиссаровой, В.И. Осиновым приводятся данные о формировании просадочности в элементарном объеме грунтов при их разуплотнении в процессе циклического промачивания-высыхания.



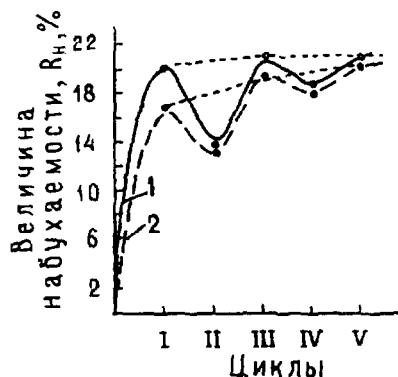


Рис. 45. Зависимость величины набухаемости лёссов из района г. Волжского от количества циклов увлажнения и высушивания:

1 — набухаемость лёсса после просадки под нагрузкой 0,04 МПа, 2 — набухаемость этого же лёсса после просадки под нагрузкой 0,3 МПа

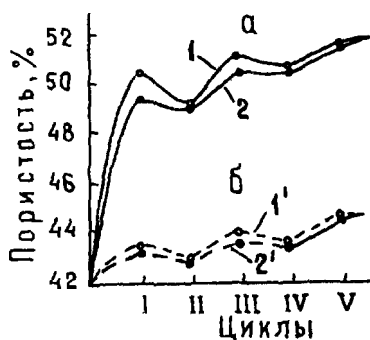


Рис. 46. Кривые изменения пористости лёсса из района г. Волжского при циклическом набухании (а) и циклической усадке (б): кривые 1 и 1' — для лёсса после его просадки под нагрузкой 0,3 МПа, кривые 2 и 2' — для того же лёсса после его просадки под нагрузкой 0,04 МПа

Учитывая, что в ходе геологической истории лёссы испытывают многократное (циклическое) увлажнение и высушивание, В.И. Осипов (1985) высказал предположение, что развитие именно этого процесса (т.е. постоянное изменение влажностного режима) обуславливает поддержание в них высокой пористости и нахождение в недоуплотненном или разуплотненном состоянии. Для проверки этой точки зрения были проведены специальные лабораторные исследования по изучению объемных изменений в лёссах при их циклическом увлажнении и высушивании. Для исследований были использованы образцы из лёссовой толщи в районе г. Буденновска (Северный Кавказ) и лёссы из района г. Волжского (Прикаспийская впадина). Из лёссового разреза района г. Буденновска было взято два образца: один из верхней просадочной части с глубины 6,3 м, второй — с глубины 97,5 м из непросадочной части разреза. Из района г. Волжского было отобрано два образца с глубины 2,4 м. Оба образца изучались после их просадки при замачивании, первый под природной нагрузкой (0,04 МПа), второй под нагрузкой 0,3 МПа.

Проведение циклического увлажнения и усадки осуществлялось в приборе А.М. Васильева. Первоначально велось определение свободной набухаемости образцов при их увлажнении, после чего образцы высушивались на воздухе до постоянного веса, и определялась их усадка. Затем проводился повторный цикл ув-

лажнения. По результатам проведения  $n$ -циклов (до шести) увлажнения-высушивания строилась зависимость изменения величины набухаемости, влажности набухания и пористости в функции циклов набухания-усадки.

Результаты экспериментов представлены на рис. 44—46 и показывают следующее:

- при первом увлажнении лёссов происходит их набухание, величина которого зависит от исходной плотности и влажности образца (наименьшую набухаемость показали просадочные лёссы из района г. Буденновск — деформация набухания 3—6%; лёссы из района г. Волжского, испытывавшие просадку, показали набухаемость, равную 16—20%; наибольшую величину набухаемости (деформация набухания 22—24%) дал образец непросадочного лёсса из района г. Буденновска);
- при последующих циклах увлажнения-высушивания величина набухаемости постепенно циклически возрастает, достигая своего максимального значения при  $n$ -цикле, после чего остается неизменной (см. рис. 44);
- с увеличением количества циклов в лёссовых грунтах исчезает анизотропия набухаемости и идет сближение ее величин в нарушенном и ненарушенном состоянии лёссов.

Подобные закономерности циклической набухаемости, по мнению В.И. Осипова (1985), объясняются тем, “что при многократном увлажнении и высушивании в породе идет серия процессов, приводящих к разрушению цементационных контактов, перераспределению глинистого материала и разориентации структурных элементов. С последним процессом, в частности, связана потеря породой первоначальных седиментационных признаков (слоистости, микротекстурных особенностей), характерная для просадочных лёссовых толщ”.

Результаты изучения изменения пористости лёссовых пород при их циклическом увлажнении и высушивании показывают, что по мере увеличения циклов идет возрастание пористости системы не только на стадии набухания, но и в воздушно-сухом состоянии, т.е. повторное высушивание не приводит грунт к исходной пористости, а идет необратимый процесс разуплотнения системы. В результате этого просевший лёсс после неоднократного увлажнения и высушивания вновь разуплотняется и приобретает просадочные свойства (пористость образцов лёсса после просадки под нагрузками 0,3 и 0,04 МПа составляла соответственно 39,8 и 42,2%, после пяти циклов увлажнения-высушивания в сухом состоянии — 44,6%).

Аналогичные эксперименты были проведены Н.Н. Комиссаровой и Н.В. Коломийцевым (1987, 1988) с пылеватыми суглинками водного и субаэрального генезиса. Их опыты по изучению роли циклического набухания в формировании просадочной структуры и просадочности лёссовых пород проводились на образцах, отобранных из различных регионов (Чирчик-Ахангаранской и Прикаспийской впадин, Украинского щита). По составу грунты представляли собой легко- и среднесуглинистые лёссы, легкие и средние лёссовидные суглинки. В экспериментах использовались непросадочные разности лёссовых пород ненарушенного сложения при исходной влажности, равной гигроскопической.

Образцы заключались в кольца большого диаметра (объемом  $280 \text{ см}^3$ ) и капиллярно водонасыщались при отсутствии внешнего давления. Деформация набухания фиксировалась с помощью индикатора часового типа. По достижении максимальной деформации образцы высушивались при комнатной температуре до гигроскопической влажности. После этого определялись просадочные свойства по методу одной кривой при дополнительной нагрузке 0,3 МПа. Число циклов увлажнения-высушивания составляло до пяти.

Результаты экспериментов показали, что процесс циклического набухания-усадки носит необратимый характер и приводит к общему разуплотнению породы. Увеличение общей пористости образцов непросадочного легкосуглинистого лёсса ташкентского комплекса после пяти циклов набухания усадки достигает 3%. После каждого цикла образцы становились рыхлее, появились визуально заметные горизонтальные щелевидные поры, возникновение которых, по мнению авторов, связано с напряжениями усадки при дегидратации набухшей системы. Пористость образца, определенная по площади снимка (данные электронно-микроскопических исследований), увеличилась от 39 до 46%. Величина относительной просадочности составила 10—14% (при дополнительной нагрузке 0,3 МПа). Эти данные позволили авторам (Коломийцев, 1985; Коломийцев, Комиссарова, 1987) сделать вывод, что разуплотнение непросадочных лёссовых пород происходит в основном за счет набухания, в ходе которого отмечается перераспределение структурных элементов, изменение характера контактов между ними и порового пространства, в результате чего структура грунта приближается к структуре просадочной лёссовой породы.

Результаты описанных экспериментов согласуются с данными, полученными Нажем Абдул Муниром (1986) совместно с Н.В. Коломийцевым для лёссовых пород голодностепского комплекса в Узбекистане: близкие по составу и свойствам дегидрати-

рованные лёссовые породы на орошаемых массивах обладают большей просадочностью, чем аналогичные разности на смежных неорошаемых массивах. Модельными экспериментами было установлено, что при циклическом замачивании-высушивании образцов, взятых с неорошаемой территории, наблюдается повышение относительной просадочности, тогда как у образцов с орошаемой территории она практически не менялась. Сравнительная характеристика микростроения последних как естественного сложения, так и после одного и пяти циклов увлажнения-высушивания показывает их практически полное сходство. Каких-либо существенных изменений в пористости, числе и связности пор не наблюдалось.

В верхних горизонтах лёссовых толщ, где природное давление меньше прочности структурных связей, периодическое изменение влажности в процессе орошения приводит к формированию более рыхлой структуры и увеличению просадочности грунтов. В конечном итоге лёссовая порода приводит в равновесие, что подтверждается данными моделирования.

Аналогичные результаты получены Н.В. Коломийцевым (1985) применительно к лёссовым породам ательского возраста Прикаспийской впадины. Установлено, что при отсутствии хвалыньских глин, перекрывающих ательские слои в пределах отрицательных форм микрорельефа, где периодическое промачивание дождевыми и тальми водами может достигать глубины 5—6 м, сформировалась толща пород с более высокой просадочностью при одинаковой водонасыщенности по сравнению с отложениями того же возраста и состава, но залегающими на возвышенных хорошо дренируемых участках.

Более контрастны исследования, проведенные *в природных условиях, непосредственно в массивах*. Одним из первых такие данные, несмотря на критику почвенной гипотезы формирования лёссов, привел Н.Я. Денисов (1956). “Другим путем перехода глинистых пород в недоуплотненное (следует писать разуплотненное.—*В.Т.*) состояние является образование каверн, в том числе за счет деятельности землероев и глинистого карста. Появление в верхней части толщи суглинков нор сусликов, кротов и т.п. приводит к тому, что породы в ее пределах в целом становятся недоуплотненными (разуплотненными.—*В.Т.*), хотя между нормами породы могут быть и нормально уплотненные. Возникновение недоуплотнения (разуплотнения.—*В.Т.*) такого рода может быть причиной существенных неприятностей при гидротехническом строительстве, что и было, например, учтено при проектировании Волго-Донского канала” (с. 113).

Первые конкретные данные о гипергенном разуплотнении и формировании просадочных лёссовых пород привели А.В. Минервин и Е.М. Сергеев (Минервин, 1959, 1968; Минервин, Сергеев, 1961, 1964)<sup>1</sup>. Ими в пределах хребта Арга (район г. Ачинска) описан разрез, где на кварцитовых среднекембрийских песчаниках сформировался элювий, представленный лёссовидными суглинками с редкими включениями щебня этих песчаников, обладающий просадочностью (коэффициент относительной просадочности при влажности 6 и пористости 44% составил 0,04 при нагрузке 0,3 МПа) и другими особенностями, присущими лёссу. Этими же авторами установлено наличие просадочных свойств в элювиальных лёссовидных образованиях, сформировавшихся на девонских отложениях.

Позже было показано (Трофимов, 1963; Минервин, Сергеев, 1964; Трофимов, Минервин, 1966, 1968; Трофимов, Бондаренко, 1983а, и др.), что в районах с гумидным климатом процессы современного гипергенного преобразования (облёссования) пылеватых супесчано-суглинистых пород достаточно активно протекают лишь в пределах очень хорошо дренированных территорий. К их числу в первую очередь относятся узкие приречные, прогрессивно дренируемые вследствие эрозионного подмыва участки различных геоморфологических элементов. Именно на таких участках надпойменных террас и междуречных равнин развиты гипергенно преобразованные отложения различного возраста и генезиса, которые приобрели морфологию лёссовых пород, а в целом ряде разрезов и просадочные свойства.

Уникальные данные о распределении величин просадочности и скорости ее формирования в таких разрезах для центральных районов Западно-Сибирской плиты получены сотрудниками Тюменской инженерно-геологической экспедиции геологического факультета Московского университета (Трофимов, Бондаренко, 1980а, 1985, 1988; Бондаренко, 1983; Экзогеодинамика..., 1986). Программа этих работ была разработана нами.

Изучение генезиса и скорости формирования просадочности, распределение ее величины по разрезу и простираению толщи потребовали специального опробования толщ, залегающих непосредственно у бровок молодых склонов — надоползневых уступов с известной датой смещения последнего оползневого тела или осыпных подмываемых склонов. При опробовании каждого раз-

---

<sup>1</sup> Эти данные, доказывающие работоспособность именно этой гипотезы, рассмотрены далее при обсуждении экспериментальных доказательств формирования просадочности лёссовых пород криоэлювиальным способом

реза приходился ряд шурфов. Первый из них вскрывал всю мощность облессованных пород и заглублялся на 5 м в глубину склона от его бровки. Другие закладывались на расстоянии 10, 50 и 100 м от бровки склона. Образцы-монолиты для исследований отбирались как по вертикальным, так и по горизонтальным рядам: первый горизонтальный ряд — с глубины 1 м и непосредственно под современным почвенным слоем, следующие ряды — последовательно через 1 м вниз по разрезу толщи. Первый вертикальный ряд образцов отбирался непосредственно с обнаженного склона, последующие — на расстоянии 1, 3, 5, 10, 50, 100 м от него (Трофимов, Бондаренко, 1983).

Одним из первых разрезов, в котором были получены данные о скорости развития современного облессования в породах относительно невысокой дисперсности, является разрез “Кирпичное”, расположенный в пределах молодого оползневого склона по правому берегу Оби непосредственно напротив устья Иртыша и опробованный в 1977 г. Здесь в 1968 г. произошел очень крупный оползень, полностью сместивший ранее дегидратированные комплексы пород. На бровку склона были выведены породы с региональными значениями их естественной влажности (!) и пористости.

Гипергенному преобразованию после смещения оползня здесь в верхней части массива подверглась толща верхнечетвертичных озерно-аллювиальных отложений. Она имела следующее строение:

- 0,0—1,1 м — дерново-подзолистая суглинистая почва, включающая гор.  $A_0$ , — лесная подстилка (0,0—0,4 м); гор.  $A_1$  — суглинок легкий серовато-коричневого цвета, рыхлый, сухой, с многочисленными включениями растительных остатков и корней (0,04—0,5 м); гор.  $A_2$  — суглинок легкий желтовато-серого цвета с белесоватым оттенком макропористый, рыхлый с многочисленными включениями растительных корней; отмечаются вертикальные каналы (3—5 мм), полые или заполненные растительными остатками (0,4—0,7 м); гор. В — суглинок легкий темно-коричневого цвета, с многочисленными включениями растительных корней и обуглившихся остатков древесной растительности (0,7—0,9 м); гор. В—С — суглинок легкий желтовато-серого цвета, пористый, слабовлажный, слабоожеженный (0,9—1,1 м).
- 1,1—2,6 м — суглинок легкий желтовато-серого цвета, пористый с углистыми включениями, ожеженный, разбит трещинами толщиной 2—3 см, заполненными средним темно-коричневого цвета, ожеженным.
- 2,6—6,5 м — суглинок легкий желтовато-серого цвета, более темный, более плотный и влажный, чем в верхних горизонтах; на глубине 2,6—3,0 м встречаются включения гравия, пятна и гнезда углистого вещества и ожежения.

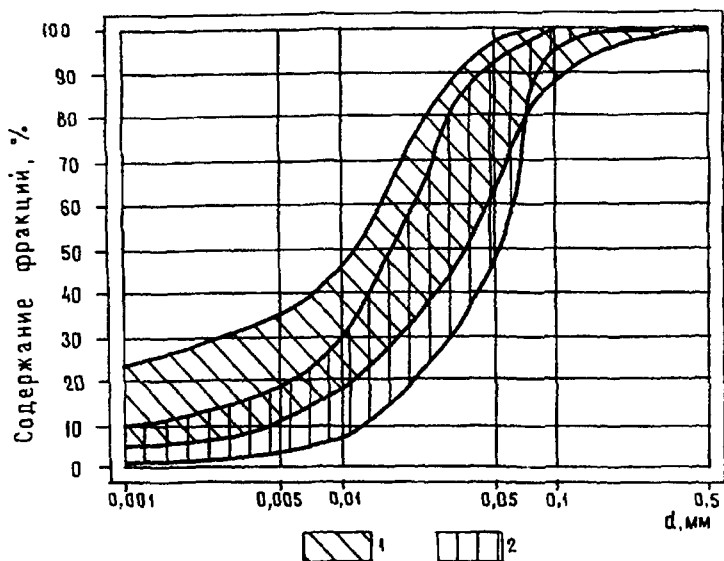


Рис. 47. Гранулометрический (1) и микроагрегатный (2) составы лёссовых пород разреза "Кирпичное" по данным опробования в 37 точках

Непосредственно в обнажении с его поверхности суглинков очень сухой, твердый, пористый, до глубины 3,0 м разбит вертикальными трещинами, за счет чего образуется вертикальная отдельность в лёссовых породах. Стенки трещин интенсивно ожеlezнены, и на них отмечаются натеки карбонатного вещества.

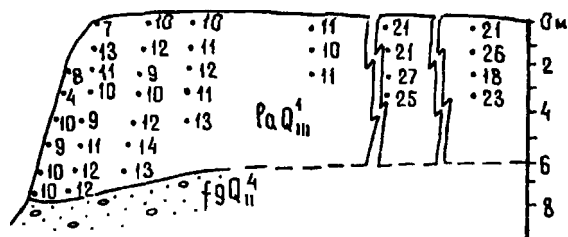
В глубь водораздельной поверхности вся верхняя часть толщи хорошо прослеживается, но заметно меняет цвет от палевого до светло-коричневого, увеличивается влажность, количество углистых включений и ожеlezнение. Мощность лёссовых пород в разрезе "Кирпичное" изменчива. В данном обнажении она составляет 6,5—7,5 м.

По составу лёссовые породы этого разреза достаточно однородны и в основном представлены лёссами легкосуглинистыми крупнопылеватыми (по классификации С.С. Морозова), в составе которых преобладает крупная пыль (49—70%). Содержание глинистых частиц составляет 5—15%. Более тяжелые гранулометрические разности — легкие и средние лёссовидные суглинки — отмечены лишь в четырех точках опробования из 37. В массиве все разности пород агрегированы (рис. 47), причем наиболее сильно в присклоновой части разреза. Содержание карбонатов изменяется в этой части толщи от сотых долей процента в верхних горизонтах разреза до 2% в нижних.

По мере удаления от поверхности склона в глубь массива содержание карбонатов уменьшается (десятые и сотые доли процента) и незначительно изменяется по разрезу.

Распределение значений естественной влажности весьма специфично. В прибровочной части разреза (до 10 м в глубь массива) ее величина составляет в основном 7—12%; лишь в ряде точек опробования она достигала 13—15%. По мере дальнейшего удаления от бровки склона она заметно возрастает и на расстоянии 50 м от него достигает

Рис. 48. Распределение значений естественной влажности (%) лёссовых пород разреза "Кирпичное"

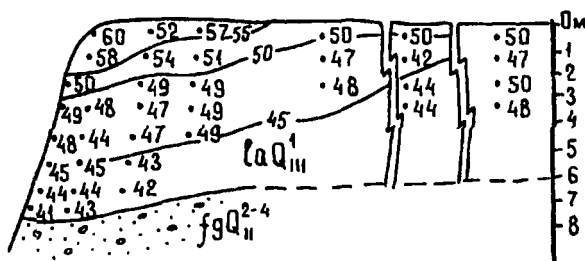


21—27% (рис. 48), что соответствует региональному значению влажности пород этого состава в данном районе.

Пористость пород высокая и закономерно уменьшается вниз по разрезу толщи (рис. 49). В верхней ее части она превышает 50%, а близ бровки склона достигает 55—60%. Общая картина распределения значений пористости по разрезу и простиранию свидетельствует о значительном гипергенном разуплотнении пород в присклоновой части толщи.

Изучение де-

Рис. 49. Распределение значений пористости (%) облёссованных пород в разрезе "Кирпичное" (по В.Т. Трофимову и В.С. Бондаренко, 1983)



формационных свойств облёссованных разностей озерно-аллювиальных отложений показало, что часть из них обладает просадочностью. Величина коэффициента относительной просадочности при бытовой нагрузке достигает 0,03—0,08, а при нагрузке 0,3 МПа — 0,05—0,09. Мощность просадочных лёссовых пород при бытовой нагрузке в присклоновой части разреза достигает 2,5 м, в глубь склона зона таких пород резко сужается и выклинивается на расстоянии 5 м от его бровки. Закономерности изменения показателей просадочности лёссовых пород при нагрузке 0,3 МПа



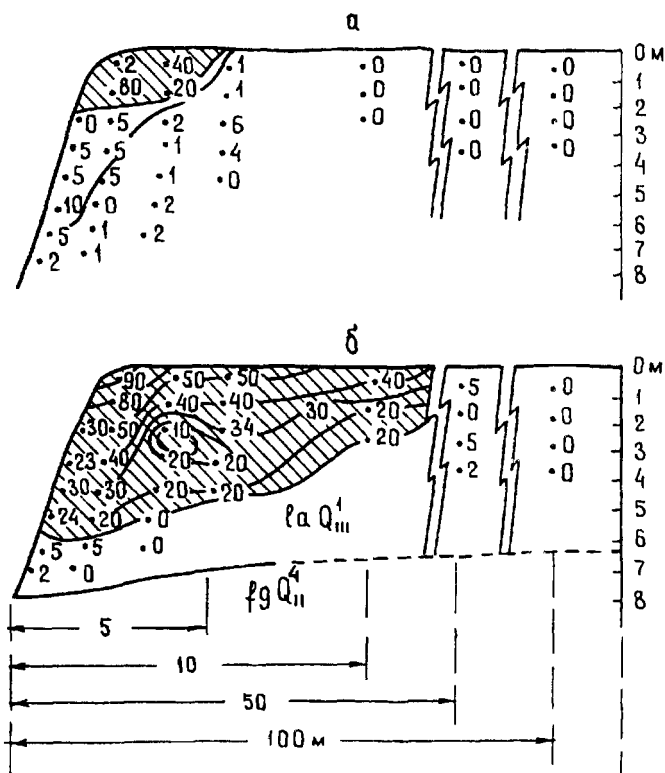


Рис 50 Распределение значений коэффициента относительной просадочности  $\varepsilon \cdot 10^3$ ) облёсанных пород разреза "Кирпичное" при природной нагрузке (а) и при давлении 0,3 МПа (б), заштрихована зона с величиной  $\delta_{пр} \geq 0,01$  (по В.Т Трофимову и В.С Бондаренко)

в целом такие же. Однако мощность просадочной зоны в при-склоновой части достигает 5—6 м, ширина же ее составляет 30—40 м (рис. 50).

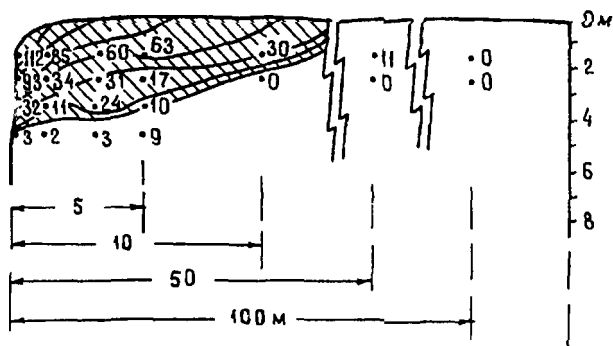
Картина распределения величины коэффициента относительной просадочности тесно увязана с характером распределения значений влажности и пористости. Это, безусловно, свидетельствует о том, что процессы дегидратации толщи и ее разуплотнения в ходе гипергенного преобразования пород обусловили формирование просадочных свойств у наиболее интенсивно облёсанных разностей.

Скорость формирования просадочных свойств у лёссовых пород в разрезе "Кирпичное" достаточно велика. Зона просадочных легкосуглинистых крупнопылеватых лёссовых пород указанных размеров в пределах надоползневой массива образовалась за 10—12 лет, после того как в этом районе произошел

крупный оползень и в прибрежной части надоползневого массива озерно-аллювиальные сильно увлажненные пылеватые породы невысокой дисперсности начали активно изменяться гипергенными процессами.

Такая же картина распределения естественной влажности, пористости и коэффициента относительной просадочности при природной и дополнительной нагрузках установлена для толщи, сложенной олигоценowymi облёссованными озерно-аллювиальными образованиями в разрезе "Малый Атлым", расположенном на правом берегу Оби (Бондаренко, 1983; Экзогеодинамика..., 1986). В этом разрезе также преобладают лёссы легкосуглинистые крупнопылеватые, бескарбонатные (содержание карбонатов — десятые и тысячные доли процента), незасоленные. Величина коэффициента относительной просадочности при природной нагрузке составила 0,007—0,021, при нагрузке 0,3 МПа — 0,06—0,11. Распределение его значений при последней нагрузке показано на рис. 51. В целом оно аналогично разрезу "Кирпичное" (см. рис. 50), но ширина просадочной зоны уже — до 20 м.

Рис. 51. Распределение значений коэффициентов относительной просадочности облёссованных пород при нагрузке 0,3 МПа в разрезе "Малый Атлым" (заштрихована зона с величиной  $\delta_{пр} \geq 0,01$ )



Особенности современного облёсывания пылеватых высокодисперсных пород были изучены на примере разреза среднечетвертичных озерно-аллювиальных отложений перигляциальной зоны Западной Сибири в районе г. Тобольска и выше него. Этот разрез расположен в верхней по течению наиболее древней части молодого, подмываемого обнаженного правобережного склона Иртыша, в разных участках которого периодически происходят небольшие по объему современные осыпи, обвалы и осы.

Строение этого разреза более сложно по сравнению с разрезом "Кирпичное". В обнажении у г. Тобольска был описан следующий разрез лёссовых пород:

0,0—1,0 м — дерново-подзолистая суглинистая почва, включающая гор.  $A_0$ , — лесная подстилка (0,0—0,3 м); гор.  $A_1$  — суглинок легкий темно-серого цвета, рыхлый, сухой,

- с многочисленными включениями растительных корней (0,3—0,2 м); гор. А<sub>2</sub> — суглинок легкий светло-серого цвета, известковистый, пронизан корнями древесных растений (0,2—0,5 м); гор. В — суглинок легкий темно-серого цвета до коричневатого, слегка влажный, гумусированный (0,5—1,0 м);
- 1,0—6,0 м — суглинок легкий палево-охристого цвета до бурого, пористый, плотный. В верхней части (интервал 1,5—4 м) горизонт наиболее плотного суглинка, менее пористого, сильно ожеженного и имеющего с поверхности рыже-бурый цвет. Ожежение неравномерно в виде пятен, вкраплений и прожилков рыжего цвета. Гумус в виде мельчайших вкрапленников рассеян по породе более-менее равномерно, наибольшее скопление его на глубине 6,0—6,5 м;
- 6,0—7,5 м — суглинок тяжелый зеленовато-серого цвета, влажный, пластичный, липкий, с большим количеством пятен ожежения, конкреции рыжей супеси размером до 7 см в поперечнике, вкраплений гумуса;
- 7,5—8,0 м — суглинок тяжелый, почти черного цвета, плотный, влажный, пластичный, слоистый, сильно огумусирован;
- 8,0—10,8 м — суглинок зеленовато-серого цвета, влажный, пластичный, с большим количеством пятен ожежения, вкраплений гумуса;
- 10,8—11,8 м — суглинок тяжелый, почти черного цвета, влажный, сильно огумусирован, местами ожежен.

Вся толща неравномерно ожежена в виде пятен, затеков, вкраплений, прожилков. Вкрапления органического вещества более или менее равномерно рассеяны по всей породе. В обнажении породы имеют белесый вид, крепкие. Верхние 3 м представляют собой вертикальную стенку, разбитую трещинами на столбчатые отдельности. Вертикальная отдельность обусловлена двумя типами трещин: трещины, поверхность которых параллельна поверхности склона, и вертикальные трещины, расположенные под малыми углами к поверхности склона. Стенки трещин интенсивно ожежены. Трещиноватость характерна только для прибровочной части, вглубь и по простиранию ее интенсивность резко убывает.

Разрез сложен в основном средними и тяжелыми лёссовидными суглинками (по классификации С.С. Морозова), содержащими от 16 до 40% глинистых частиц (рис. 52). Эти породы также агрегированы, причем наиболее сильно в верхней при-склоновой части разреза. Именно здесь отмечены лёссы легко-суглинистые, формирование которых произошло скорее всего в ходе необратимой агрегации тонкодисперсных частиц в пылеватые при дегидратации толщи в ходе современного облессования. На глубинах 7,5—8,0 и 10,8—11,8 м в толще этих отложений

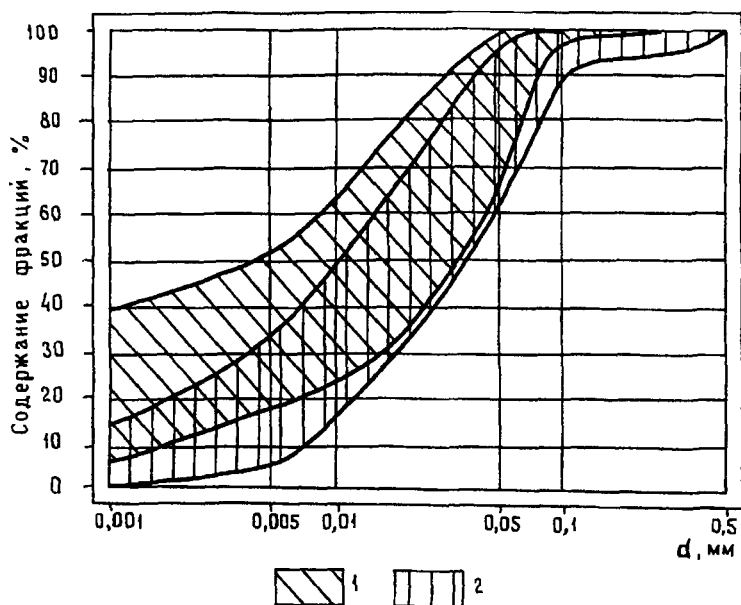


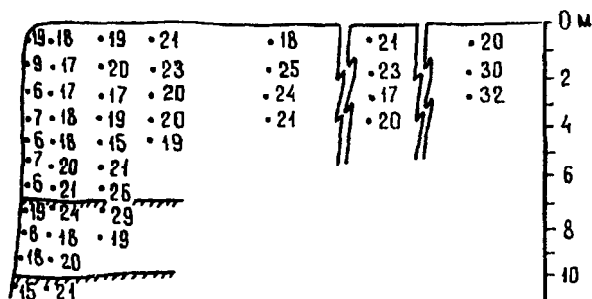
Рис. 52. Гранулометрический (1) и микроагрегатный (2) составы лёссовых пород разреза "Тобольск" по данным опробования в 47 точках

прослеживаются хорошо выраженные гумусированные горизонты, рассматриваемые многими исследователями в качестве погребенных гидроморфных почв. Гумусированный горизонт на глубине 3—3,5 м, отчетливо выраженный во многих обнажениях в районе г. Тобольска, в данном разрезе практически не прослеживается (Трофимов, Бондаренко, 1983а).

Естественная влажность пород, залегающих непосредственно близ обнаженного склона (первый вертикальный ряд опробования), составляет в основном 5—12%, а в гумусированных горизонтах она возрастает до 15—19%. Уже на глубине 1 м от него ее значения увеличиваются до 17—27%, а на расстоянии 100 м — до 30—32% (рис. 53).

Консистенция пород в присклоновой части разреза

Рис. 53. Распределение значений естественной влажности (%) лёссовых пород разреза "Тобольск"



твердая и полутвердая. По мере удаления от склона в глубь массива значения показателя консистенции возрастают, и на удалении 100 м с глубины 2 м породы имеют мягкопластичную консистенцию.

Пористость пород в разрезе колеблется от 34—38 до 51%. Распределение ее значений по разрезу и простираению весьма специфично и отлично от однородных разрезов, сложенных облёссованными породами легкого гранулометрического состава (см. рис. 49 и 54). Наибольшие значения пористости в описываемом разрезе характерны для очень узкой прибрежной его части, а также для удаленных на 10—100 м от обнаженной стенки части толщи, где породы имеют высокую влажность. В разрезе четко выделяются две зоны с пониженными значениями пористости (34—45%). Нижняя из них (см. рис. 54) в целом

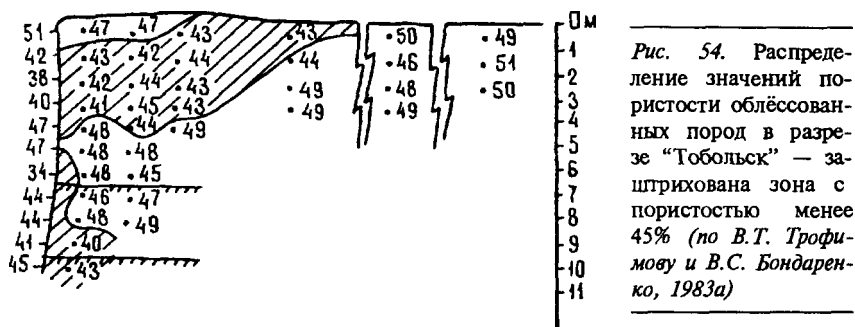


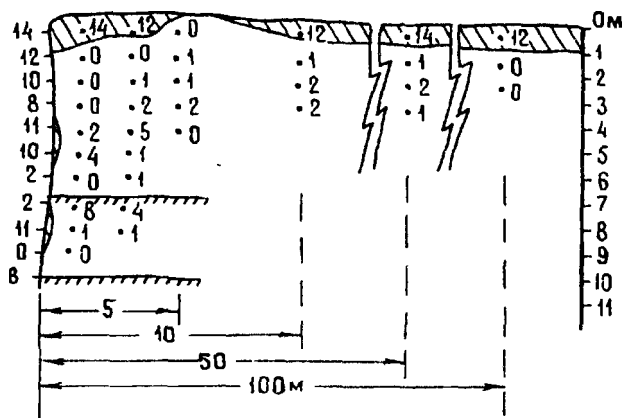
Рис. 54. Распределение значений пористости облёссованных пород в разрезе "Тобольск" — заштрихована зона с пористостью менее 45% (по В.Т. Трофимову и В.С. Бондаренко, 1983а)

занимает обычное положение и в основном связана с уплотнением пород под действием вышележащей толщи. Верхняя зона своим происхождением обязана процессу усадки, который привел к существенному уплотнению пород в ходе прогрессивной дегидратации пород близ обнаженного склона (эта же причина во многом обусловила широкое развитие уплотненных пород на обнаженной стенке разреза в его нижней части). В пользу этого заключения свидетельствует форма этой уплотненной зоны, замещение ее по простираению и разрезу менее уплотненными породами с более высокой влажностью. Появление пород с высокой пористостью (47—51%) в самой верхней прибрежной части разреза связано с последующим выветриванием, обусловившим разуплотнение пород, испытавших перед этим усадку в процессе дегидратации толщи. Малые размеры этой зоны связаны, с одной стороны, с небольшим сроком гипергенного изменения пород опробованного склона, а с другой — с очень малой скоростью разуплотнения уплотненных вследствие усадки высокодисперсных пород.

Замачивание пород под бытовой нагрузкой показало, что все они, несмотря на хорошо выраженный лёссовый облик, наличие макропор и невысокую влажность, не приобрели просадочных свойств. Лишь у образцов, отобранных с глубины 1 м (первый горизонтальный ряд опробования) и имеющих пористость 47—51%, величина коэффициента относительной просадочности достигла 0,005. Более того, большая часть образцов, отобранных из верхней зоны уплотненных вследствие усадки пород, набухала под бытовой нагрузкой после их увлажнения. Аналогичным образом вели себя и образцы пород с пористостью 34—44%, отобранные непосредственно со стенки обнажения в нижней его части (Трофимов, Бондаренко, 1983б).

Испытания под нагрузкой 0,3 МПа показали, что облессованные породы приповерхностной части разреза при замачивании дают просадку (точнее, дополнительную осадку). Величина коэффициента относительной просадочности пород, залегающих под современным почвенным слоем, составляет 0,012—0,014. Для образцов, отобранных непосредственно со стенки обнажения, значения этого показателя в ряде точек достигают 0,01—0,014. В пределах остальной части разреза развиты породы, коэффициент относительной просадочности которых составляет тысячные доли, и породы, не дающие даже столь малой просадки при нагрузке 0,3 МПа (рис. 55). Один из образцов, отобранный

Рис. 55. Распределение значений коэффициента относительной просадочности облессованных пород ( $\varepsilon \cdot 10^3$ ) при нагрузке 0,3 МПа, в разрезе "Тобольск"; заштрихована зона с величиной  $\delta_{пр} \geq 0,01$  (по В.Т. Трофимову и В.С. Бондаренко, 1983б)



с поверхности обнаженного склона в пределах верхней зоны уплотненных пород, набухал при нагрузке 0,3 МПа.

Скорость развития современного процесса облессования в разрезах высокодисперсных пород, судя по полученным данным, существенно ниже скорости облессования толщ, залегающих в

аналогичных условиях, но сложенных легкими по составу породами. Да и сам процесс имеет более сложный характер. Во многом это связано с тем, что на первых этапах активного гипергенного преобразования толщ при уменьшении их влажности в процессе прогрессивного дренирования присклоновой части массива высокодисперсные разности пород вследствие усадки значительно уплотняются, о чем справедливо писал Н.Я. Денисов (1953). Необходимо дальнейшее глубокое преобразование структуры этих отложений под влиянием выветривания, разуплотнения их при сохранении невысокой влажности, чтобы сформировались отчетливо выраженные просадочные свойства. Такие преобразования наиболее активно протекают в самой приповерхностной части толщи, где активным разуплотняющим фактором выступает сезонное промерзание — протаивание пород. Именно здесь в районах с гумидным климатом быстрее всего и формируются просадочные разности облёсsovанных образований.

Следует подчеркнуть, что в ходе геологического развития территории процессы разуплотнения постоянно охватывают все более глубокие горизонты ранее уплотненных под влиянием усадки пород. И если снос такого разуплотненного материала с поверхности обнаженного склона прекращается (например, вследствие задернения склона и т.д.), то со временем даже в гумидных условиях может сформироваться более мощная приповерхностная зона просадочных облёсsovанных средних и тяжелых суглинков. Правомoрность такой схемы подтверждается данными, полученными автором и В.С. Бондаренко (Трофимов, Бондаренко, 1983а) для разреза непосредственно в районе г. Тобольска в пределах задернованной части склона в толще тех же облёсsovанных среднечетвертичных озерно-аллювиальных отложений. В пределах этого разреза, где действие процессов выветривания протекало более длительное время и разуплотненные породы не сносились (склон задернован), мощность приповерхностной просадочной зоны больше, чем в описанных ранее разрезах. Просадочные свойства здесь проявляются не только при нагрузке 0,3 МПа, но и при бытовой нагрузке.

Таким образом, разрезы пылеватых пород различного возраста и генезиса в пределах линейно ориентированных прогрессивно дренируемых приречных массивов под влиянием процессов выветривания при интенсивной дегидратации толщи за относительно короткий срок (не более 10—15 лет) в гумидных условиях центральных районов Западной Сибири приобретают лёссовый облик. При этом экспериментально доказаны следующие позиции:

- 1) в толщах относительно легкого гранулометрического состава за этот срок формируется достаточно широкая (до

- 30—40 м) и мощная (до 5—6 м) зона с отчетливо выраженными при дополнительных нагрузках просадочными свойствами;
- 2) в разрезах, сложенных высокодисперсными породами, за этот же срок такие свойства приобретает лишь очень узкая приповерхностная зона; большая же часть пород, залегающих непосредственно близ прибровочной части склона, это свойство не приобретает;
  - 3) при длительном развитии процессов облессования в легких по составу толщах и отсутствии сноса разуплотненных образований ширина зоны просадочных разностей не превысит первую сотню метров, в разрезах высокодисперсных отложений составит первые метры, а при крайне благоприятных условиях — первый десяток метров;
  - 4) все эти просадочные разности являются сугубо современными образованиями.

#### 4.3.

#### **Экспериментальные данные о формировании эпигенетической просадочности лессовых пород различного генезиса и возраста в соответствии с криоэлювиальной гипотезой**

Среди гипотез о формировании просадочности как эпигенетического свойства лессовых пород в ходе гипергенного преобразования и разуплотнения пород также интенсивно разрабатывается, как показано в гл. 2, направление, называемое “криоэлювиальным”. В соответствии с представлениями Е.М. Сергеева и особенно А.В. Минервина, наиболее активно развивавшего его, просадочность лессовых пород формируется лишь при воздействии криогенных процессов на выветривающиеся породы. Особенно большая роль отводится сторонниками этой гипотезы разуплотнению пород в верхней части разреза за счет сезонного промерзания пород, циклическому изменению температур в слое годовых теплооборотов, а также сублимации льда из мерзлых толщ, что позволяет разуплотненным, ранее льдистым породам сохранить высокую эпигенетическую пористость и приобретать просадочность в условиях низкой влажности при переходе температур горных пород в область положительных значений.

В этом, “криоэлювиальном”, направлении проведены большие полевые и лабораторные работы и получен интересный экспериментальный материал. *Лабораторные эксперименты о влия-*



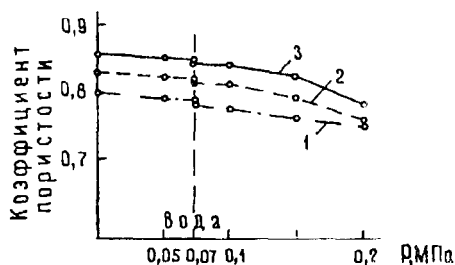


Рис. 56. График просадочности среднего лёссовидного суглинка после промораживания в условиях закрытой системы при  $W = 9-11\%$  (по А.М. Воронину, 1973):

1 — до промерзания и оттаивания, 2 — после 5 циклов промерзания и оттаивания, 3 — после 15 циклов

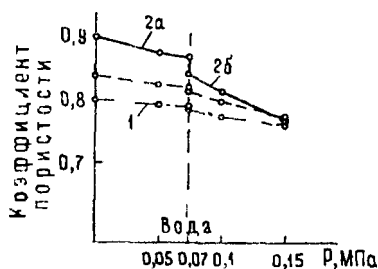


Рис. 57. Изменение просадочности среднего лёссовидного суглинка после одностороннего промораживания в условиях закрытой системы при  $W = 22-28\%$  (по А.М. Воронину, 1973):

1 — до промерзания и оттаивания, 2 — после 10 циклов промерзания и оттаивания а — верхняя более разуплотненная часть образца, б — нижняя часть образца

янии циклического (сезонного) промерзания-оттаивания на возникновение просадочных свойств у лёссовых пород водного генезиса выполнили А.М. Воронин и А.В. Минервин (1973). Для моделирования ими были взяты образцы заведомо непросадочного среднего лёссовидного суглинка, отобранного с глубины 5 м (Приобское плато, Западная Сибирь). Образцы грунта с ненарушенной структурой были заключены в кольца высотой 50 мм и диаметром 76 мм. Промораживание образцов в условиях закрытой и открытой систем проводилось при температуре  $-5$ ,  $-10$  и  $-20^\circ$  в холодильной камере без принудительной циркуляции воздуха. Подток дистиллированной воды при промораживании в условиях открытой системы осуществлялся через водонасыщенный кварцевый песок. Оттаивание и высушивание образцов до первоначальной (естественной) влажности производилось при положительных ( $18-20^\circ$ ) и при отрицательных ( $-20^\circ$ ) температурах путем сублимации льда при вакуумной сушке. После проведения 1, 5, 10, 15 и 20 циклов промораживания-оттаивания и высушивания исследовались просадочные свойства по методу одной кривой.

Результаты экспериментов показали, что даже в условиях закрытой системы и даже при промерзании сверху с большой скоростью (при температуре  $-20^\circ$ ) и последующем оттаивании и высушивании у пород с влажностью, большей влажности нижнего предела пластичности, происходит значительное разуплотнение грунта, особенно в верхней части пылеватого суглинистого образца. Плотность скелета грунта снизилась с 1,53

до  $1,46 \text{ г/см}^3$ , коэффициент относительной просадочности при природной нагрузке ( $0,07 \text{ МПа}$ ) увеличился с  $0,001$  до  $0,014$  (рис. 56).

Еще более показательными оказались данные, полученные при промерзании образцов непросадочных озерно-аллювиальных суглинков в условиях открытой системы (рис. 57). В этом случае в результате миграции влаги к фронту промерзания и значительного сегрегационного льдовыделения происходит интенсивное пучение грунтов и связанное с ним разуплотнение резко возрастает. Многократное промерзание образцов лёссовидных суглинков различной дисперсности и пористости приводило к существенному изменению строения грунта и, как правило, сопровождалось увеличением пористости. В результате разуплотнения лёссовидных суглинков уже после первого цикла промерзания-оттаивания и высушивания пористость увеличилась в среднем на  $2\%$ . При увеличении количества циклов наблюдается постепенное увеличение разуплотненности образцов. После пяти циклов пористость увеличилась в среднем на  $2,7\%$ , после пятидесяти — на  $5\%$ . Соответственно изменению строения грунта и увеличению пористости происходит увеличение просадочности лёссовых пород при природной нагрузке. Коэффициент относительной просадочности увеличился с  $0,009$  после первого цикла до  $0,014$  после десяти циклов и до  $0,02$  после тридцати циклов.

Компрессионные испытания при нагрузках, превышающих природные, показали значительное увеличение просадочности образцов грунта после пяти циклов по сравнению со значениями до промерзания при нагрузке  $0,15 \text{ МПа}$  в среднем с  $0,004$  до  $0,017$ , при нагрузке  $0,2 \text{ МПа}$  с  $0,006$  до  $0,048$  и при нагрузке  $0,3 \text{ МПа}$  с  $0,02$  до  $0,072$ . Аналогичные результаты были получены и на образцах средних лёссовидных суглинков, отобранных как с меньших ( $3 \text{ м}$ ), так и с больших ( $10 \text{ м}$ ) глубин.

Существенное влияние на интенсивность разуплотнения влажных пород оказывает, по данным А.М. Воронина (1973), скорость их промерзания. В процессе лабораторных испытаний показано, что при промерзании образцов с температурой на их верхней поверхности  $-5^\circ$  достигается в первое время существенно большее разуплотнение по сравнению с температурами  $-10$  и  $-20^\circ$ . Так, уже после первого цикла промерзания-оттаивания и последующего высушивания при первой из этих температур плотность скелета снизилась с  $1,53$  до  $1,44 \text{ г/см}^3$  и до  $1,49 \text{ г/см}^3$  при второй и третьей; коэффициент относительной просадочности при природной нагрузке ( $0,07 \text{ МПа}$ ) соответ-

ственно достиг 0,016, 0,011 и 0,009 (средние данные серии опытов). Эта закономерность объясняется более благоприятными условиями для миграции воды и сегрегационного выделения льда (а следовательно, и разуплотнения) при температуре  $-5^{\circ}$  на поверхности образца, чем при более низких температурах, когда фронт промерзания продвигается с существенно более высокой скоростью.

Такие различия в интенсивности разуплотнения, которое постепенно нарастает, сохраняются достаточно долго (до 15 циклов и более). Однако при возрастании количества циклов промерзания-оттаивания и последующем высушивании происходит постепенное выравнивание величин коэффициента относительной просадочности лёссовидных суглинков, промерзавших при разных температурах.

Особенно контрастно разуплотнение и формирование просадочных свойств происходит в случае сублимационного иссушения замороженных образцов. В экспериментах А.М. Воронина (1973) часть образцов после первого цикла промерзания в условиях открытой системы, существенно увеличивших влажность за счет миграции, была высушена таким путем в мерзлом состоянии до значений влажности 9—11% (равной естественной). “При сублимационной сушке происходит незначительная усадка грунта, и возникающее при промерзании разуплотненное строение грунта в основном сохраняется. Так, после 1-го цикла промерзания в результате разуплотнения у образцов, влажность которых в результате миграции влаги стала больше предела текучести (28%), объемный вес скелета уменьшился на  $0,11 \text{ г/см}^3$ , а коэффициент относительной просадочности резко увеличился по сравнению со значениями до промерзания и стал равен 0,024. У образцов лёссовидных суглинков, влажность которых после 1-го цикла промерзания увеличилась до 21—26%, наблюдалось меньшее разуплотнение, и соответственно коэффициент относительной просадочности увеличился в меньшей степени — он равен в среднем 0,016. Близкие результаты были получены и для других разностей лёссовидных суглинков” (Воронин, 1973, с. 21).

Важное значение имеет еще одна серия опытов, проведенных А.М. Ворониным. Им экспериментально доказана возможность появления вторичной эпигенетической просадочности под воздействием промораживания в условиях открытой системы и последующего сублимационного иссушения у лёссовых пород, ранее утративших просадочные свойства в результате увлажнения (рис. 58). Оказалось, что уже после первого цикла промораживания и иссушения указанным способом просадочные свой-

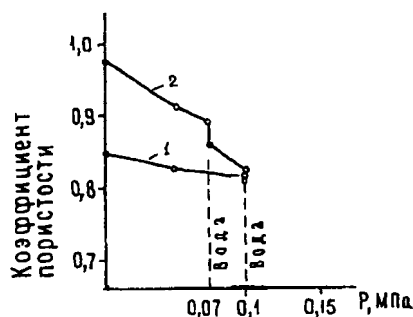


Рис. 58. Кривая уплотнения (2) лёссовидного суглинки, просевшего при нагрузке 0,1 МПа, после одного цикла последующего промерзания в условиях открытой системы и сублимационного иссушения до значений естественной влажности (по А.М. Воронину, 1973). Замачивание проведено при нагрузке 0,07 МПа, соответствующей природной в точке отбора монолитного образца (глубина отбора 5 м). Кривая 1 — уплотнение природного образца, замоченного при нагрузке 0,1 МПа

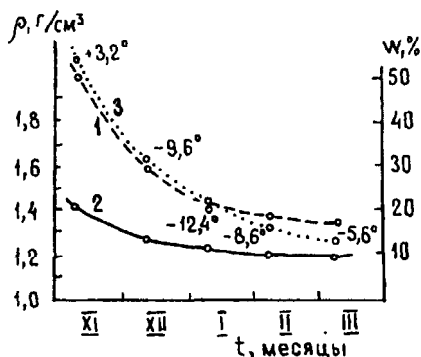


Рис. 59. Изменение плотности грунта (1), плотности скелета (2) и объемной влажности (3) водонасыщенного крупнопылеватого илистого искусственного осадка при промерзании и последующем иссушении в зимний период 1971—1972 гг. Цифры у кривой изменения влажности — температура грунта на глубине 0,5 м (по А.В. Минервину, 1975)

ства у лёссовых грунтов, их ранее утративших, восстанавливаются, причем под нагрузкой, равной природной. Такое поведение просевшей, а затем промерзшей и сублимационно иссушенной системы установлено для широкого диапазона нагрузок (0,1—0,8 МПа), при которых была реализована первичная просадочность. При этом показано, что чем выше это давление, тем меньшее разуплотнение претерпевают после первого цикла промораживания и вакуумной (сублимационной) сушки просевшие перед этим образцы, тем меньше величина коэффициента относительной просадочности у таких вторично разуплотненных лёссовых пород.

В 1964 г. А.В. Минервин и Е.М. Сергеев опубликовали данные, показывающие, что в природных условиях юга Красноярского края лёссовые породы различного генезиса, залегающие на молодых, главным образом верхнечетвертичных, элементах рельефа, просадочны (коэффициент относительной просадочности 0,01—0,08 при нагрузке 0,3 МПа) в основном до глубины 3 м, что тесно связано с современной глубиной сезонного промерзания пород. На более древних элементах рельефа в этом районе такой связи не наблюдается. Большая мощность просадочных пород (6—7 м) на древних элементах рельефа

связывается этими авторами с большой глубиной сезонного промерзания холодных периодов более ранних эпох четвертичного периода.

Позже тесная связь глубины расположения наиболее просадочных лёссовых пород (и при бытовой нагрузке, и при давлении 0,3 МПа) и глубины их сезонного промерзания установлена Д.В. Бородулиной. Наличие просадочных свойств при природной нагрузке (коэффициент относительной просадочности до 0,025) у пород аллювиального и озерно-аллювиального генезиса однозначно свидетельствует об эпигенетичности этих свойств, об их гипергенном происхождении.

Формирование просадочности в *массиве* искусственных отложений изучалось А.В. Минервиным в Назаровском бурогольном карьере Красноярского края, где вскрышные породы представлены лёссами. Разрабатываются лёссы в разрезе гидромонитором; при этом лёссовая пульпа сбрасывается в отработанные участки карьера, где в зимние месяцы ежегодно промерзает, затем оттаивает, перекрывается новой порцией осадка и т.д. Таким путем “за 25 лет сформировались искусственные проловиальные лёссовые породы мощностью около 10 м, обладающие просадочностью в условиях природного давления и 0,3 МПа” (Минервин, 1982а, с. 55).

В 1971—1972 гг. А.В. Минервиным был проведен интересный эксперимент по изучению процесса преобразования водонасыщенного крупнопылеватого искусственного осадка в лёссовую просадочную породу в условиях Минусинских впадин и юга Западной Сибири. В процессе его осуществления замоченные и растертые для нарушения природного сложения лёссовые породы осаждались в виде водонасыщенного ила мощностью до 1 м в котлованы объемом 1—1,5 м<sup>3</sup>, которые были изолированы от окружающих со дна и боков пород. В процессе сезонного промерзания плотность скелета пылеватого искусственного осадка вследствие льдовыделения и пучения очень существенно снизилась (с 1,42 до 1,19 г/см<sup>3</sup>). Столь же существенно снизилась и объемная влажность (рис. 59), что А.В. Минервин объясняет сублимационной возгонкой льда в условиях Сибирского антициклона. К апрелю 1972 г. этот осадок приобрел структуру естественной вмещающей породы. Его просадочность, определенная в мае 1972 г., составила 2—5% при нагрузке 0,1 МПа<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Результаты этого эксперимента можно рассматривать скорее как доказательство “работы” криосингенетически-сублимационной гипотезы А.В. Минервина.

Обобщая результаты опыта, проведенного в пределах высокой поймы Оби в Новосибирской области (о чем было рассказано выше), А.В. Минервин (1980) делает вывод, что не только осушение аллювия (в результате понижения уровня грунтовых вод), но и глубокое сезонное промерзание, оттаивание и последующее иссушение превратило водонасыщенный аллювий в типичный просадочный лёсс.

Принципиальная возможность формирования просадочности в условиях природного давления пролювиальных лёссовых пород Средней Азии при сезонном криогенезе изучена А.В. Минервиным (1992) и А.В. Минервиным и Х.Л. Рахматуллаевым (1990) в трех разрезах: “Чарвак” Чирчикской впадины, “Чашманигар I” Таджикской депрессии, “Первомайский” предгорьев Копетдага, Ашхабадская область. Почвенно-климатические условия предгорных зон всех разрезов примерно едины и обуславливают высокую естественную влажность лёссов. На плакорных участках изученных разрезов лёссы под природным давлением непросадочны на всю мощность. Исследование лёссов непосредственно со стенок обнажений и старых разведочных траншей показало, что они в этих геоморфологических и микроклиматических условиях приобретают ярко выраженные просадочные свойства в условиях природного давления и естественной влажности (в пределах величин максимальная гигроскопическая — максимальная молекулярная влагоемкость).

Таким образом, имеются убедительные доказательства, что процессы сезонного промерзания и последующего оттаивания оказывают существенное влияние на разуплотнение и формирование просадочности в верхней части толщи. Это подтверждают и лабораторные эксперименты А.М. Воронина. С нашей точки зрения, все это свидетельствует об огромной роли гипергенных изменений пород в приобретении ими просадочных свойств.

#### 4.4.

### **Экспериментальные данные о формировании эпигенетической просадочности лёссовых пород различного генезиса и возраста в соответствии с криоэпигенетическо-сублимационной гипотезой А.В. Минервина**

Автор этой гипотезы приводит два принципиально важных положения, позволяющих, с его точки зрения, оценить природу и генезис просадочных свойств лёссовых пород: 1) в плейсто-

ценовой истории эпохи лёссовобразования связаны с перигляциальными зонами оледенений и общепланетарными похолоданиями климата; 2) в своей геологической жизни лёссовые породы неоднократно находились в многолетне- и сезонномерзлом состоянии, т.е. прошли в процессе формирования стадию криолито-генеза (Минервин, 1980). Им приводится около 150 разрезов в талой зоне юга России, “в которых деформация лёссовых пород и погребенных почв верхнего плейстоцена имеет несомненную криогенную природу”.

В литературе описан лишь один эксперимент, направленный на подтверждение этой гипотезы. С 1975 по 1990 г. А.В. Минервиним проводился эксперимент по искусственной деградации мерзлоты в пылеватых аллювиальных отложениях. С этой целью к востоку от г. Ужура на второй террасе р. Ужурки (Минусинская впадина) была оборудована *опытная площадка*. В центре площади была пробурена скважина диаметром 50 мм на всю (16 м) мощность пылеватых аллювиальных пород для режимных замеров температуры, плотности и объемной влажности-льдистости. Замеры проводились один раз в неделю в течение 15 лет. Литологические особенности исследованных мерзлых пылеватых пород принципиально ничем не отличаются от типичных лёссовых образований. Естественная весовая влажность-льдистость отложений достигала 18—21%. Криогенная текстура лёссовых пород приближается к массивной. Общая пористость максимальная в деятельном слое (50—53%) при капиллярной влажности сокращается до 40—41%.

Деградация многолетней мерзлоты осуществлялась двумя способами теплоизоляции. На зимний период территория эксперимента площадью 2 × 2 м с режимной скважиной в центре покрывалась слоем древесных опилок мощностью 2 м; таким способом массив пород изолировался от притока зимнего холода. С прекращением заморозков покров опилок убирался. В весенний, летний, осенний периоды года на время дождей площадка перекрывалась шиферной крышей, чтобы не терять тепло при испарении атмосферных осадков. Все остальное теплое время опытный участок подвергался воздействию солнечной радиации.

Заметная деградация мерзлоты в лёссовых породах началась сверху к 1978 г., а в 1989 г. практически вся толща пылеватых аллювиальных отложений находилась в талом состоянии. Отложения подсохли до влажности 12—14%. Ранней осенью 1990 г. на площадке был пройден шурф глубиной 14 м с отбором монолитов искусственно талых пород через 0,5—1 м. Компрессионные испытания показали, что ранее мерзлые породы приобрели

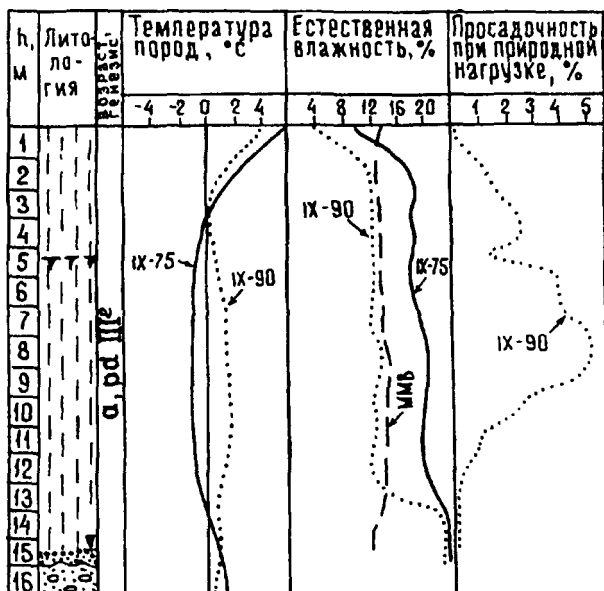


Рис. 60. Деградация многолетнемерзлых аллювиальных лёссовых пород и формирование в них просадочности в условиях природного давления (II надпойменная терраса р. Ужурки, восточная окраина г. Ужур) (по А.В. Минервину, 1992)

четко выраженные просадочные свойства: при природной нагрузке 1,5—5,0%, при дополнительном давлении 2,5—8,9%; исчезновение просадочных свойств произошло при приближении к зоне капиллярного увлажнения (рис. 60)<sup>1</sup>.

\* \* \*

Таким образом, можно однозначно констатировать, что получен обширный и убедительный материал о работоспособности различных гипотез формирования эпигенетической просадочности разных по генезису толщ лёссовых пород. На очереди — завершение создания теории формирования просадочности эоловых, делювиальных и пролювиальных лёссовых образований, в основу которой будет положен дегидратационно-недоуплотнительный механизм гипотезы Н.Я. Денисова; аналогична ситуация с теорией формирования данного свойства у аллювиальных лёссовых пород. Теория формирования просадочности как гипергенно-

<sup>1</sup> Автора данной книги многое смущает в этих данных А.В. Минервина, вплоть до вопроса: проводился ли этот эксперимент?



го свойства также требует завершения. Все эти теории будут выступать как частные и описывать формирование просадочности лёссовых пород определенных генетических типов в соответствии с тем или иным механизмом.

Однако в реальной природной обстановке в одном разрезе скорее всего действует одновременно или последовательно несколько из рассмотренных механизмов, постулированных в различных из рассмотренных выше гипотез. Поэтому общая теория формирования просадочности лёссовых пород должна быть сформулирована с учетом этого на основе частных теорий формирования данного свойства у различных генетических типов лёссовых пород.

Одним из необходимых элементов названных частных и общей теорий являются логико-графические модели формирования просадочности лёссовых пород. Перейдем к их рассмотрению.

## ЛОГИКО-ГРАФИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСАДОЧНОСТИ ЛЁССОВЫХ ПОРОД

---

### 5.1.

#### О моделях формирования свойств горных пород

В широком понимании под моделью понимают образ (в том числе условный или мысленный — изображение, описание, схема, чертеж, график, план, карта и т.п.) или прообраз (образец) “какого-либо объекта или системы объектов, используемых при определенных условиях в качестве их “заместителя” или “представителя” (БСЭ, т. 16, с. 399). Первый из этих видов моделей выражает идею описания, имитации некой действительной натуры, действительно явления, первичного по отношению к модели, а второй — реальное воплощение чего-либо в виде образца, эталона, устройства. “Иными словами, модель может быть системой и более высокого уровня абстракции, чем ее оригинал (как в первом случае), и более низкой (как во втором)” (там же).

Исходя из этого определим, что *“модель формирования свойства грунта” — это абстрактная модель, описывающая тем или иным способом с той или иной степенью схематизации процесс (механизм) становления этого свойства грунта.* Такая модель может быть сконструирована в виде словесного описания, включая теорию в целом или ее фрагменты (вербальная модель), графика и графа (логико-графическая модель), математического описания (математическая модель). Все эти типы моделей относятся к так называемым знаковым моделям.

При разработке моделей руководствуются необходимостью выполнения (соблюдения) двух условий (принципов) — изоморфизма и гомоморфизма. В соответствии с главным требованием

первого из них должно выполняться полное тождество модели и изучаемого объекта. “Однако выполнение этого условия может оказаться затруднительным или ненужным, да и вообще настаивать на нем неразумно, поскольку никакого упрощения исследовательской задачи, являющейся важнейшим стимулом для моделирования, использование лишь изоморфных моделей, не дает”. В связи с этим “на следующем уровне мы переходим к представлению о модели как об упрощенном образце моделируемого объекта, т.е. к требованию гомоморфизма модели оригиналу” (там же, с. 399).

При построении моделей формирования свойств грунтов мы вынуждены использовать последний принцип хотя бы потому, что само наше знание о процессах формирования свойств часто достаточно схематично, по крайней мере во временном отношении. Представляется, что в этом нет большого порока, поскольку такие модели отражают главное в способе формирования свойств грунтов; эти модели — модели теоретические, они передают главную идею и главные закономерности формирования данного свойства грунта; по существу, они объясняют суть формирования данного явления.

В грунтоведении в качестве генетических моделей обсуждаемого направления используют *модели вербальные* и *модели логико-графические*. Первые являются наиболее распространенными, именно они, как правило, приводятся в учебной и научной литературе. Логико-графические модели формирования свойств различных типов грунтов, в частности просадочности лёссовых грунтов, впервые, по-видимому, были опубликованы Н.Я. Денисовым. Эти позиции были развиты и конкретизированы применительно к лёссовым породам разных генетических типов (Трофимов, 1986, 1990).

*Логико-графические модели формирования свойств грунтов представляют собой графическую модель, отображающую главные, логически важные закономерности формирования данного свойства грунта, в нашем случае просадочности.* Они, с одной стороны, призваны объяснить способ формирования данного свойства грунта, а с другой — предсказать (или помочь осуществить это) его изменение при тех или иных природных и техногенных воздействиях, проявляющихся раздельно или чаще действующих совместно.

Логико-графические модели как относительно простой и визуально легко воспринимаемый тип моделей широко используются в различных науках, в том числе и в инженерной геологии. В качестве классического примера можно привести широко известные реологические модели различных тел-грунтов (упруго-

го, упруговязкого, пластического, вязкопластического и т.п.), диаграммы и розы трещиноватости, треугольную схему классификации гравелистых грунтов по дисперсности. Эти примеры можно приводить в большом количестве. Но главное — это четко подчеркнуть, что, по существу, логико-графической моделью является любое графическое изображение зависимости того или иного свойства грунта от того или иного показателя состава, строения и состояния грунта или какого-то его другого свойства.

На современном этапе развития грунтоведения наиболее продвинутой оказалась разработка логико-графических моделей формирования просадочных свойств лёссовых грунтов. В настоящее время при этом используются два принципиально различных подхода: 1) создание моделей в системе прямоугольных координат “пористость пород — давление (напряжение) от веса вышележащей толщи осадков и пород (и дополнительной нагрузки)”;

2) создание моделей с использованием треугольных фазовых диаграмм Гиббса. Первый из этих подходов используется чаще всего (Б.Ф. Галай, В.Т. Трофимов, А.В. Ершова и др.) и восходит к работам сороковых-пятидесятых годов Н.Я. Денисова, второй предложен в 1996 г. Т.В. Андреевой. Первое из этих направлений включает два типа моделей: а) логико-графические модели формирования просадочности лёссовых пород применительно к малому объему пород — к объему элементарного слоя; б) те же модели, в которых предпринимается попытка графически описать процесс формирования просадочности в толще пород и во времени.

Содержание моделей первых двух типов рассматривается в последующих разделах главы (5.2—5.4). Содержание же второго подхода проистекает из рис. 61. Характеризуя этот метод, Т.В. Андреева (1996, с. 52) пишет: “Благодаря наглядному графическому изображению соотношения всех трех фаз пылеватого осадка в разные моменты времени этот способ позволяет принципиально по-новому проследить формирование недоуплотненности лёссовых грунтов в ходе различных процессов (гидратации, дегидратации, усадки, уплотнения и т.д.). Получена серия диаграмм, иллюстрирующих процесс формирования недоуплотненности лёссовых грунтов по различным схемам. Важно, что получившиеся диаграммы не просто показывают логическую последовательность процесса, как логико-графические модели Н.Я. Денисова, В.Т. Трофимова и др., а отображают фактическое изменение фазового состава исходного осадка определенного гранулометрического состава в процессе формирования недоуплотненных лёссовых грунтов.

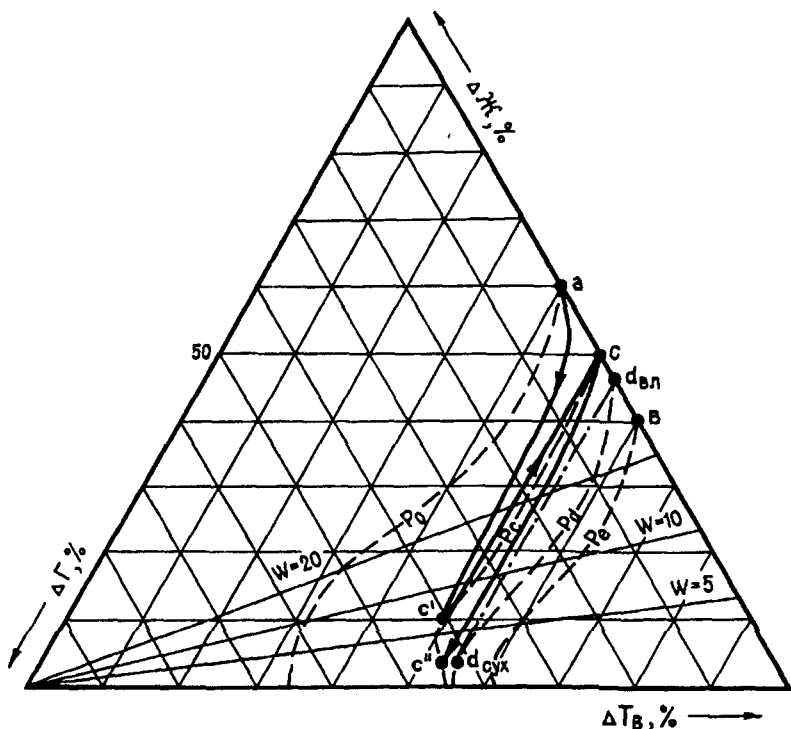


Рис. 61. Модель изменения фазового состава лёссовой породы при формировании ее недоуплотненности в ходе гидратации-дегидратации (по Т.В. Андреевой, 1996):

$\Delta T_v$ ,  $\Delta G$ ,  $\Delta J$ , — объемное содержание (в %) твердого, газообразного и жидкого компонентов в единице объема породы;  $W = 5$ ,  $W = 10$ ,  $W = 20$  — весовая влажность (в %) породы (линии строятся для соответствующего значения плотности твердой компоненты породы);  $P_0$  — изолиния давления от собственного веса пылеватого осадка при разной влажности (от сухого состояния до полного водонасыщения);  $P_c$  — изолиния давления, при котором происходит дегидратация осадка — молодой породы (0,01 МПа в экспериментах Т.В. Андреевой);  $P_d$  — изолиния давления, при котором плотность молодой породы равна плотности нормально уплотненного грунта (в экспериментах — 0,02 МПа);  $P_e$  — давление, при котором определяется просадочность породы;  $ab$  — линия уплотнения постоянно водонасыщенного осадка;  $ac$  — линия дегидратации и уплотнения прогрессивно подсыхающего осадка;  $c'c$  — линия гидратации и уплотнения (точнее, доуплотнения) повторно увлажненного молодой породы;  $cc''$  — линия дегидратации и уплотнения повторно подсыхающей молодой породы;  $d_{сух}$  — плотность сухого грунта, равная плотности нормально уплотненного водонасыщенного грунта ( $d_{вл}$ ) того же гранулометрического и минерального состава; недоуплотненность породы отображается отрезком “проекция точки  $c$ ” на прямую, соединяющую оси  $\Delta T_v$  и  $\Delta J$ ” и проходящую через точку  $b$ ”

Применение подобных диаграмм дает возможность прогнозировать величину просадочности лёссового грунта и изменение его свойств в ходе различных процессов”. Добавим, что это же можно сделать и на основе логико-графических моделей и других типов, выделенных выше.

При создании логико-графических моделей формирования просадочности лёссовых грунтов в ходе прогрессивного литогенеза должны учитываться следующие важнейшие позиции: а) закономерности уплотнения пылеватого постоянно полностью водонасыщенного грунта; б) закономерности уплотнения пылеватого воздушно-сухого осадка; в) закономерности уплотнения прогрессивно дегидратируемого первоначально водонасыщенного пылеватого грунта того же гранулометрического и химико-минерального состава под весом вышележащих пород; г) закономерности проявления усадки в ходе дегидратации первоначально водонасыщенного пылеватого грунта того же гранулометрического и химико-минерального состава; д) закономерности уплотнения маловлажного высокопористого лёссового грунта под дополнительной нагрузкой (от веса накапливающейся толщи или возведенного сооружения) того же гранулометрического и химико-минерального состава; е) соотношение этих процессов, действующих в одних случаях на определенных интервалах времени одновременно, в других — частично или полностью последовательно, что и приводит к формированию разных генетических типов просадочности лёссовых грунтов. Воздействие процессов регрессивного литогенеза приводит к необходимости учета при построении логико-графических моделей гипергенного преобразования-разуплотнения лёссовых грунтов, обуславливающего формирование (появление) или трансформацию величины, а во многих случаях и генетического типа ранее сформировавшейся сингенетической просадочности.

Следует подчеркнуть, что отображение следствия действия всех этих процессов в системе координат “пористость—давление” — задача не очень простая даже в отношении элементарного слоя грунта. Это обусловлено тем, что давление (нагрузка на рассматриваемый слой от вышележащих образований) не остается постоянным во времени: оно даже в одном цикле “осаждение — увлажнение — дегидратация” возрастает от минимума в начале накопления воздушно-сухого осадка элементарного слоя до максимума при его водонасыщении (например, золотого осадка), затем прогрессивно уменьшается при его дегидратации. Таких циклов может быть несколько.

Еще более существенно поступательно-возвратное изменение нагрузки во времени при анализе формирования просадочности толщи лёссовых пород, особенно циклично построенных. В этом случае периодическое изменение нагрузки связано не только с цикличностью его вследствие “гидратации — дегидратации” элементарных слоев, но и с перерывом ее роста вследствие остановки осадконакопления и даже уменьшения ее (на-

грузки) при дополнительной дегидратации толщи в эти временные интервалы.

В целом следует сделать вывод: разработка логико-графических моделей формирования просадочных свойств грунтов, моделей генетических по своему содержанию, “продвинута” в грунтоведении пока в недостаточной степени. Они созданы в небольшом числе и применительно к достаточно узкому кругу грунтов по их химико-минеральным особенностям и гранулометрическому составу. Главным недостатком большей части существующих логико-графических моделей является не существенная, как считает ряд исследователей, их схематичность, высокая степень генерализации процессов и закономерностей, а *отсутствие координаты времени на моделях* (Трофимов, 1998, 1998а) что не позволяет прямо, непосредственно на модели отразить ход процесса формирования рассматриваемого свойства грунта в физическом или геологическом времени. Пока это делается лишь косвенно, например через меняющиеся величины действующих на грунт-осадок и грунт-породу давлений или влажности. Вторым существенным недостатком большинства созданных логико-графических моделей следует считать то, что они рассматривают конкретные закономерности формирования свойств грунтов применительно к объему “элементарного слоя”. Между тем в природных условиях формирование свойств происходит в толще, нередко сложно построенной, под влиянием разных процессов, которые начинают и заканчивают свое развитие в разное время и по-разному влияют на динамику ее трансформации.

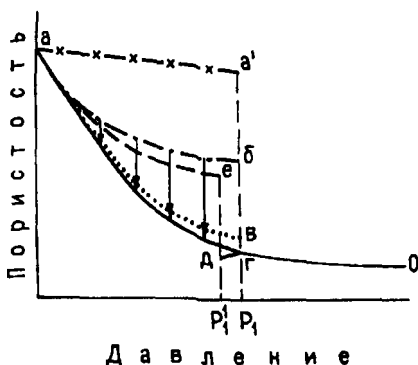
## 5.2.

### **Логико-графические модели формирования сингенетической просадочности лёссовых пород элементарного слоя**

Формирование сингенетической просадочности лёссовых грунтов различных генетических типов в принципе обусловлено сочетанием одних и тех же процессов — уплотнением под собственным весом (а затем и под дополнительным весом продолжающих накапливаться выше образований) прогрессивно дегидратируемого первоначально сильно увлажненного под влиянием разных процессов пылеватого осадка элементарного слоя, сопровождаемого на определенном этапе уменьшения исходной влажности усадкой. Совместное действие двух названных процессов (уплотнение + усадка) в этих условиях (прогрессивная дегидратация осадка) не может обеспечить эффективное уплот-

нение последнего и приводит к формированию недоуплотненного состояния образовавшегося сухого грунта (по сравнению с уплотнением водонасыщенного грунта того же гранулометрического и химико-минерального состава под той же нагрузкой)<sup>1</sup> (рис. 62). Образовавшееся на этом этапе перехода осадка в

Рис. 62. Кривая уплотнения пылеватого воздушно-сухого ( $a-a'$ ), полностью водонасыщенного ( $a-o$ ), быстро ( $a-b$ ) и замедленно ( $a-e$ ) дегидратируемого осадка под одинаковой нагрузкой  $P_1$ , влиянием усадки при гидратации нормально уплотненного осадка ( $z-d$ ) и совместным влиянием нагрузки и усадки при быстрой дегидратации ( $a-e$ ).  $P_1$  — нагрузка (давление) от веса водонасыщенного грунта,  $P_1'$  — нагрузка от веса дегидратированного грунта. Стрелками здесь и далее показана величина зоны потенциальной просадочности



молодую породу недоуплотненное состояние (и как следствие этого просадочность, сингенетическая по генезису) грунта может сохраняться геологически долго, в том числе и при продолжающемся прогрессивном накоплении толщи (роста ее веса), и при его прекращении.

**Логико-графические модели формирования сингенетической просадочности эоловых лёссовых пород.** Процессы, приводящие к формированию сингенетической просадочности в объеме элементарного слоя эоловых пылеватых образований при однократном их увлажнении, протекают в следующей последовательности: накопление воздушно-сухого эолового осадка, как правило, небольшой мощности — его увлажнение атмосферными осадками (или тальми водами) — уплотнение под собственным весом и усадка в ходе прогрессивно уменьшающейся влажности при достаточно быстрой во времени дегидратации в условиях аридного климата (см. гл. 2 и 3). Логико-графические модели формирования просадочности в ходе этой совокупности

<sup>1</sup> В ходе развития уплотнения и усадки на первых этапах их совместного развития может на какое-то время сформироваться даже переуплотненное состояние грунта вследствие наложения на осадку деформации усадки. Однако последующая дегидратация резко замедляет рост уплотнения (точнее, деформации осадки), а деформация усадки при значениях влажности, меньших влажности предела усадки, не увеличивается. В итоге образуется недоуплотненный сухой грунт.



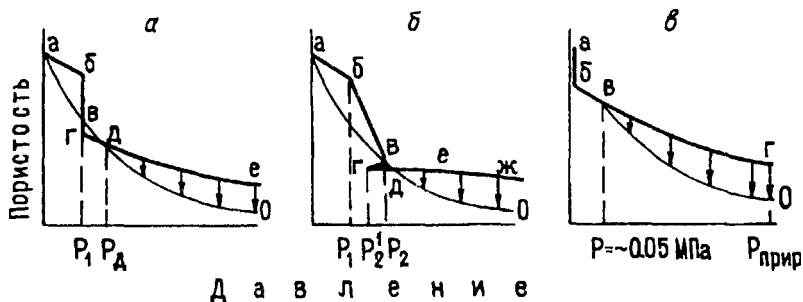


Рис. 63. Логико-графические модели уплотнения и формирования сингенетической просадочности эоловых лёссовых пород, опубликованные Н.Я. Денисовым (а), В.Т. Трофимовым (б) и Б.Ф. Галаем (в)

процессов в разном приближении, созданные Н.Я. Денисовым, Б.Ф. Галаем и В.Т. Трофимовым, приведены на рис. 63. Модели формирования-развития просадочности при разных режимах многократного увлажнения эоловых грунтов разного гранулометрического состава и последующей дегидратации созданы автором данной книги (Трофимов, 1990б).

На рис. 63 кривая  $a-o$  является кривой нормального уплотнения полностью водонасыщенного осадка (кривая истинного соответствия пористости давлению, по Н.Я. Денисову). Уплотнение вначале водонасыщенного, затем подсыхающего осадка верхнего горизонта на первом этапе его формирования (например, первый год накопления толщи) под действием собственного веса (давления  $P_1$ ) отображается на рис. 63, а отрезком  $a-б$ . Если после этого сверху накапливается новый слой<sup>1</sup> и он полностью промачивается совместно с ранее сформировавшимися, то последний доуплотняется (отрезок  $б-в$ ). Последующее высыхание этого слоя сопровождается усадкой, которая обуславливает уменьшение пористости (отрезок  $в-г$  на рис. 63, а; величина этого уменьшения зависит от состава грунта, и для лёссовых пород она обычно невелика). При последующем росте давления от вышележащих пород и вновь накапливающихся осадков и сохранении невысокой влажности кривая дальнейшего уплотнения  $г-д-е$  рассматриваемого элементарного слоя пород вскоре пересечет в точке  $д$  кривую нормального уплотнения  $a-o$  и пойдет выше нее. Вследствие этого в диапазоне давлений, больших  $P_д$ , порода будет недоуплотненной. При пос-

<sup>1</sup> В модели Н.Я. Денисова его накопление не учитывается, отражается лишь повторное увлажнение — дегидратация ранее сформировавшегося слоя.

туплении воды и сильном увлажнении пород при любом давлении в пределах данного интервала лёссовая порода будет проявлять просадочные свойства.

В модели, предложенной Н.Я. Денисовым, есть неточности. В частности, не учтено увеличение давления на рассматриваемый слой после накопления вышележащих осадков и их увлажнения, снижение давления от их веса при дегидратации пород рассматриваемого слоя и названных осадков. Кроме того, отрезок  $г—д$  и самая левая часть кривой  $д—е$  будут, по существу, субгоризонтальны и лишь затем приобретут заметный наклон. Такая картина обусловлена тем, что на первом из указанных участков ( $г—д$ ) лёссовая порода оказывается переуплотненной по отношению к действующей нагрузке, а субгоризонтальное положение второго из указанных отрезков обусловлено наличием структурной прочности и развитием в основном упругих деформаций. Лишь дальнейшее возрастание нагрузки приводит к увеличению уплотнения маловлажного лёссового грунта. Все это в известной степени учтено в модели, показанной на рис. 63, б.

В модели Б.Ф. Галая (см. рис. 63, в) уплотнение пылеватого осадка под собственным весом отражает отрезок  $а—б$ . Изменение пористости после увлажнения (до водонасыщения) осадка иллюстрирует отрезок  $б—в$ , и его дальнейшее уплотнение при просыхании — отрезок  $в—г$ . За счет разницы в уплотнении в подсохшем (отрезок  $в—г$ ) и водонасыщенном (отрезок  $в—о$ ) состояниях формируется недоуплотненность, обуславливающая просадочность лёссового грунта.

В этой модели также содержится ряд неудачных моментов. Во-первых, нагрузка при уплотнении пылеватого осадка под действием собственного веса (отрезок  $а—б$ ) близка, но не равна нулю. Во-вторых, в модели графически совершенно не отражены процессы, происходящие при увлажнении — высыхании осадка, а затем и слабой породы (например, набухание — усадка при циклическом изменении влажности).

Во всех рассмотренных моделях, а также в опубликованных нами (Трофимов, 1990б, 1998а), отрезок  $а—в$  описывает, по сути, два периода в истории формирования элементарного слоя эоловых лёссовых образований: 1) накопление воздушно-сухого осадка и его незначительное уплотнение в таком состоянии под собственным весом и 2) увлажнение в какой-то очень малой степени уплотненного этого осадка и его последующее уплотнение под весом прогрессивно дегидратируемого осадка данного элементарного слоя. В дальнейших построениях эти два этапа будут иллюстрироваться в моделях отрезками  $а—а'$  и  $а'—б$ .

Здесь же подчеркнем, что во всех моделях мы умышленно показываем все составляющие общего процесса уплотнения осадка — молодой породы в ходе образования увлажнения и дегидратации (отрезки  $a-a^I$ ,  $a^I-e$ ,  $b-e$ ). Итоговая же кривая уплотнения грунта в ходе реального процесса должна проходить по отсутствующему на моделях отрезку  $a-e$ , как это показано на рис. 62 (кривая  $a-e$ ).

Экспериментальные лабораторные данные Т.В. Андреевой, Б.Ф. Галая, О.Н. Ереминой, Н.В. Коломийцева, В.А. Королева, Е.Ю. Куликовой, В.Т. Трофимова показали (см. гл. 3), что механизм формирования просадочности золовых отложений зависит от многих факторов, в частности от дисперсности пылеватого осадка, условий и степени его промачивания, скорости дегидратации, количества циклов увлажнение—дегидратация и других причин. Это потребовало составления серии логико-графических моделей формирования сингенетической просадочности отложений этого генезиса, учитывающих особенности, свойственные различным ситуациям.

Теоретически формирование просадочности золовых отложений может происходить при их одно-, двух- и многократном промачивании—высыхании. Наиболее простой случай, реализованный в ходе лабораторных экспериментов, но скорее всего не часто происходящих в природных условиях, — однократное развитие этого процесса. Эта ситуация для разных по дисперсности осадков и различной по величине их увлажнения рассмотрена на рис. 64.

Накопление золowego осадка легкого состава (лѣссы легкосуглинистые, легкие лѣссовидные суглинки), его увлажнение до невысоких значений влажности (до степени влажности 0,3—0,4) за счет конденсации влаги или других причин, последующая дегидратация, перекрытие вышележащей толщей в условиях отсутствия повторного замачивания иллюстрирует рис. 64, а. Особенности такого хода процесса — слабое уплотнение маловлажного осадка рассматриваемого элементарного слоя под собственным весом (отрезок  $a-a'-b$ ), отсутствие или ничтожная деформация усадки (практически горизонтальный участок  $b-e$ ) при дегидратации, слабое уплотнение высохшего лѣссового грунта под весом перекрывающего слоя толщи и формирование в этом слое высокой просадочности, проявляющейся под природной нагрузкой.

В случае же высокого увлажнения (до степени влажности 0,8 и выше) подобного по составу осадка даже при постепенном подсыхании существенно увеличивается его уплотнение под собственным весом (более крутой отрезок  $a'-b$ ), наблюда-

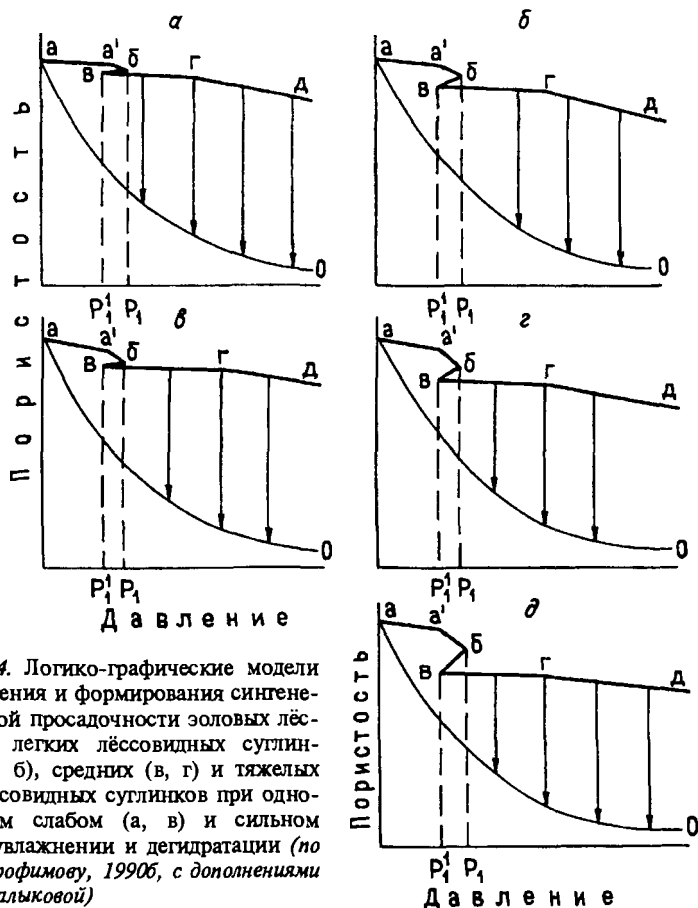


Рис. 64. Логико-графические модели уплотнения и формирования сингенетической просадочности золовых лёссов и легких лёссовидных суглинков (а, б), средних (в, г) и тяжелых (д) лёссовидных суглинков при однократном слабом (а, в) и сильном (б, г) увлажнении и дегидратации (по В.Т. Трофимову, 1906, с дополнениями С.Д. Бальковой)

ется небольшая усадка (наклонный отрезок б—в) при дегидратации: дальнейший ход кривой после высыхания и превращения осадка в связный грунт такой же, как и в первом случае. В итоге формируется менее просадочная лёссовая порода (см. рис. 64, б).

Формирование просадочности золовых отложений средне- и тяжелосуглинистого состава в случае небольшой величины его увлажнения идет, как и у осадков легкого состава (см. рис. 64, а и в). При сильном же увлажнении наблюдается более активное их уплотнение под собственным весом и более значительная усадка при дегидратации (наибольшая у тяжелых лёссовидных суглинков, рис. 64, г и д). Последнее обстоятельство приводит к формированию наименее просадочной (из охарактеризованных) лёссовой породы.

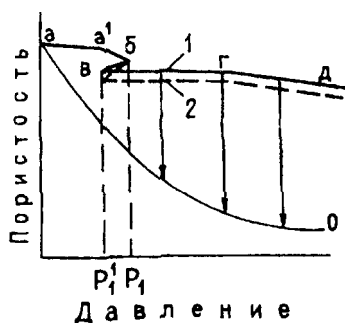


Рис. 65. Логико-графическая модель уплотнения и формирования сингенетической просадочности эоловых отложений при однократном промачивании и последующей дегидратации при разных температурах. Кривая 1 соответствует дегидратации образца при более высокой температуре (по В.Т. Трофимову, 1990б)

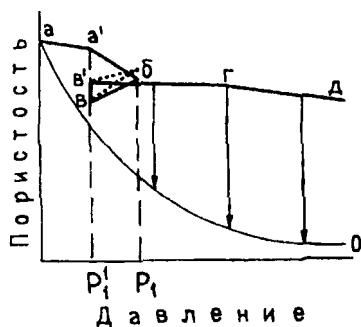


Рис. 66. Логико-графическая модель формирования сингенетической просадочности эоловых лёссовых пород с учетом эффектов “расшатывания” структуры грунта за счет циклического увлажнения-дегидратации (составлена В.Т. Трофимовым и С.Д. Бальковой)

Рассмотренные ситуации являются, по существу, экстремальными по степени увлажнения осадка. Если же влажность его находится между указанными величинами, то в ходе процесса будут наблюдаться следующие отличия по сравнению со случаем полного водонасыщения: уплотнение влажного грунта под собственным весом будет меньшим точно так же, как и величина деформации усадки при дегидратации (наклон участков  $a-b$  и  $b-e$  на графической модели будет меньшим по сравнению с рис. 64, б, г, д). Эта тенденция будет возрастать по мере уменьшения начальной влажности эолового осадка после его увлажнения, и постепенно графическая модель приблизится к изображенной на рис. 64, а и в.

Необходимо отметить, что формирующаяся величина сингенетической просадочности эоловых лёссовых пород зависит от скорости дегидратации. Увеличение температуры высыхающего после полного увлажнения осадка приводит, как свидетельствуют результаты физического моделирования, к образованию более пористой из-за меньшей величины усадки породы, обладающей более высокой просадочностью (рис. 65).

Кроме того, при повторном (и последующих) циклическом увлажнении—высыхании происходит вследствие развития процессов набухания—усадки “расшатывание” структуры ранее дегидратированного грунта, приводящее к разуплотнению породы и увеличению ее пористости. Это положение доказано лабораторными исследованиями Н.Н. Комиссаровой, Н.В. Коломийцева,

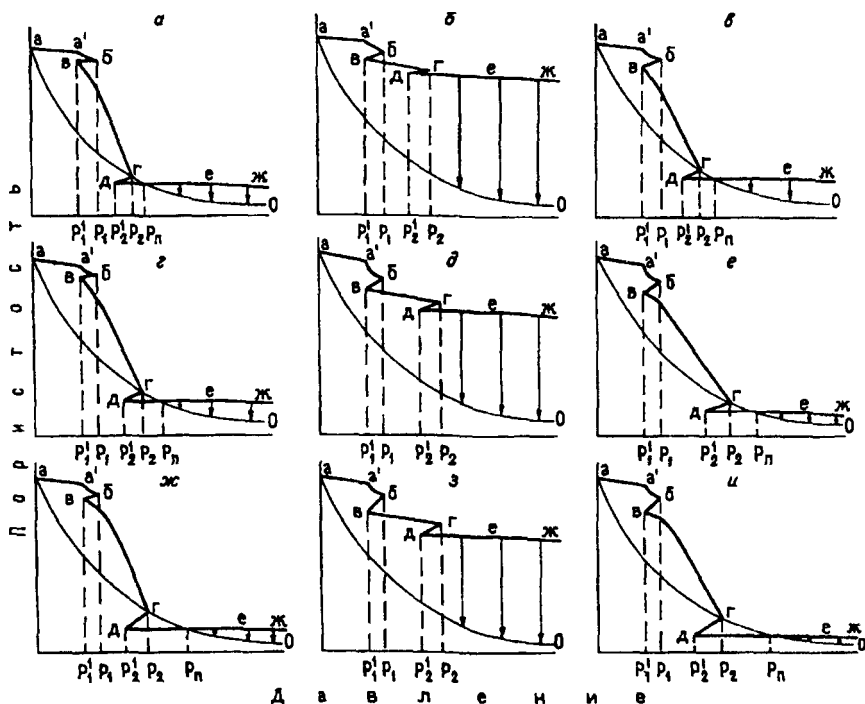


Рис. 67. Логико-графические модели уплотнения и формирования сингенетической просадочности эоловых лёссов и легких лёссовидных суглинков (а, б, в), средних (г, д, е) и тяжелых (ж, з, и) лёссовидных суглинков при разных режимах двукратного увлажнения и последующей дегидратации осадка — молодой породы элементарного слоя (по В.Т. Трофимову, 1990б, с дополнениями С.Д. Бальковой)

В.И. Осипова и полевыми наблюдениями Н.Г. Мавлянова. (Идея учета в модели этого процесса показана на рис. 66; итоговый результат процесса — отрезок  $в-в'$ .) Вследствие этого недоуплотненность породы и ее просадочность становятся большими по величине.

Более сложные ситуации отображены на рис. 67, где показаны модели формирования просадочности эоловых отложений при их двукратном промачивании—высыхании. Если после образования эолового осадка легкого состава (лёссы, легкие лёссовидные суглинки), его невысокого по значению увлажнения и высыхания вновь происходит накопление осадков следующего слоя, полное промачивание (до степени влажности 0,8—1,0) ранее дегидратированных пород, то кривая уплотнения этих насыщенных водой образований придет в точку  $г$  (если увлажнение пород не полное, то точка  $г$  будет лежать выше кривой  $а-а'$ ;

если же повторное увлажнение было слабым, то графическая модель примет такой вид: из точки *в* идет участок *в—г—д*, аналогичный отрезку *а—б—в*, но теоретически наклон отрезка *в—г* несколько меньший, чем у *а—б*; дальше кривая имеет обычный вид, отображающий уплотнение высохшей пылеватой породы). При последующей дегидратации наблюдается небольшая по величине усадка (отрезок *г—д*). Перекрытие таких пород вышележащими образованиями при исключении промачивания первых обусловит формирование просадочности, проявляющейся при природной нагрузке, превышающей значение  $P_{II}$  (см. рис. 67, а).

Закономерности уплотнения таких же (легких) по составу золовых образований, первоначально сильно-, а повторно слабо увлажненных и дегидратированных, показаны на рис. 67, б, а дважды сильно увлажненных — на рис. 67, в. И в этих случаях формируются просадочные образования.

Особенности уплотнения золовых отложений, представленных средними и тяжелыми лёссовидными суглинками, при тех же самых типах увлажнения—высыхания изображены на рис. 67, г—е и ж—и соответственно. Главное отличие — большая величина усадки, особенно в первом цикле увлажнения—высушивания, и формирование за счет этого меньшей величины просадочности по сравнению с лёссами.

В случае формирования в лёссовой породе структурных связей кристаллизационного типа их повторное сильное увлажнение при накоплении осадков следующего слоя, возможно, не приведет к полному доуплотнению, т.е. точка *г* (рис. 68) будет на-

ходиться выше кривой *а—о*, дальнейшая дегидратация не приведет к уменьшению пористости за счет усад-

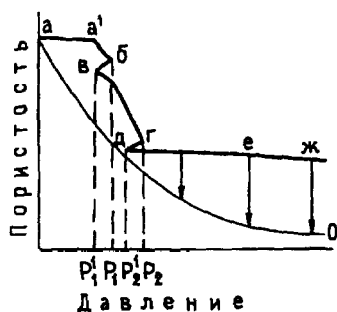


Рис. 68. Логико-графическая модель уплотнения и формирования сингенетической просадочности золовых лёссовых пород при сильном двукратном увлажнении в случае неполного разрушения структурных связей во втором цикле увлажнения (составлена В.Т. Трофимовым и С.Д. Балыковой)

ки и соответственно недоуплотненность породы и ее потенциальная просадочность будут большими по величине.

Рассмотренные модели формирования просадочности золовых лёссовых пород, описывающие одно- или двукратное разное по величине увлажнение осадков пород элементарного слоя и последующую их дегидратацию, в значительной части уже осуществле-

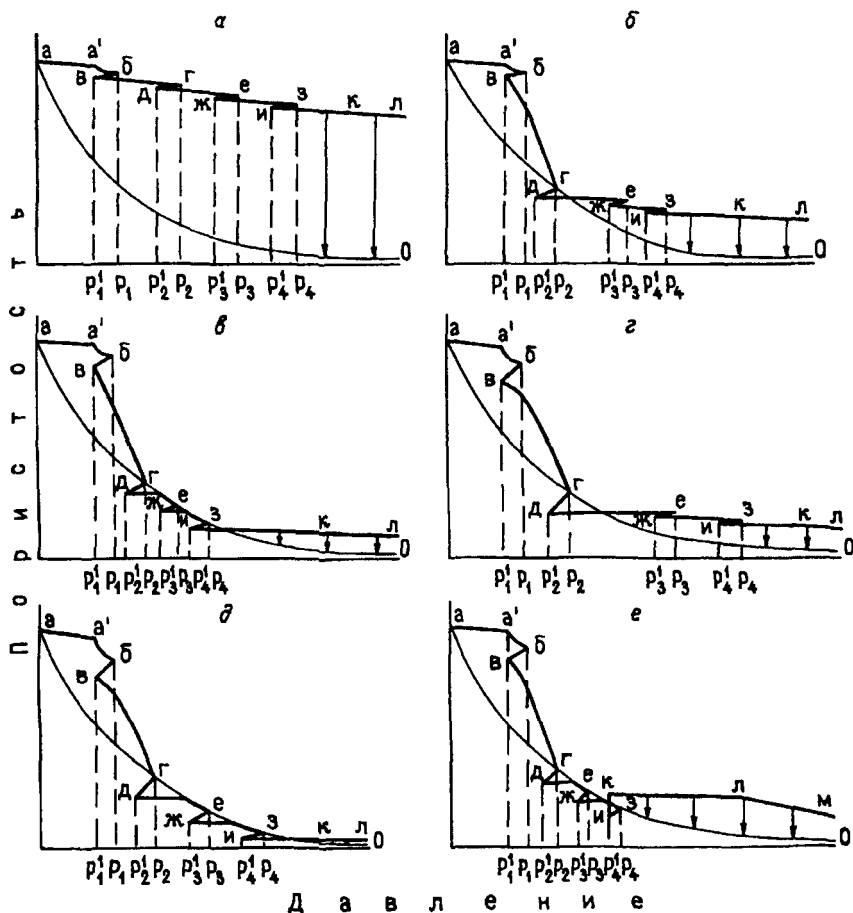


Рис. 69. Логико-графические модели уплотнения и формирования сингенетической просадочности эоловых лёссов и легких лёссовидных суглинков (а, б, в) и тяжелых лёссовидных суглинков (г, д) при разных режимах многократного увлажнения и последующей дегидратации осадка — породы элементарного слоя (по В.Т. Трофимову, 1990б, с дополнениями С.Д. Баликовой)

ны в ходе моделирования (см. гл. 3). В природной обстановке они, по-видимому, реализуются достаточно редко и должны рассматриваться как частный случай или составная часть процесса формирования просадочности эоловых отложений. Это обусловлено тем, что в реальных разрезах осадок — молодая порода элементарного слоя — в большинстве случаев промачивается в ходе субаэрального диагенеза многократно.

Такая ситуация в значительной степени учтена на рис. 69. Формирование просадочности отложений рассматриваемого ге-



незиса, представленных легкими по составу образованиями, при неоднократном их невысоком увлажнении и высыхании описано на рис. 69, а. Особенности того же процесса для таких же по гранулометрическому составу осадков при их многократном невысоком и хотя бы однократном сильном увлажнении (в данном случае во втором цикле увлажнения—высыхания) показаны на рис. 69, б.

Графическая модель уплотнения осадка — молодой породы средне- и тяжелосуглинистого состава — при многократном слабом увлажнении и высыхании практически полностью идентична рис. 69, а. Для образований такого же состава при режиме увлажнения—высыхания, описанном применительно к модели рис. 69, б, уже появляется существенное отличие — большая величина усадки (более крутое падение отрезка  $z-d$ ) при дегидратации. Именно за счет этого при одном и том же режиме увлажнения—высыхания у этих лёссовых пород наблюдается меньшая величина просадочности.

Особенности формирования недоуплотненности золовых лёссовых отложений, представленных тяжелыми лёссовидными суглинками, при сильном их увлажнении в первых двух циклах и слабом в последующих, отображены на рис. 69, г, а при многократном сильном увлажнении — на рис. 69, д. И в этих случаях формируются просадочные лёссовые породы, но величина этого свойства тут существенно ниже, чем в ранее рассмотренных ситуациях.

При таких же режимах увлажнения—высыхания осадков, сложенных лёссами и легкими лёссовидными суглинами, в графических моделях имеются отличия (рис. 69, в). Во-первых, величина уплотнения из-за усадки в каждом цикле полное увлажнение—высыхание будет меньше, чем обуславливает меньший наклон соответствующих участков кривых (например, отрезков  $b-v$ ,  $z-d$  и др.). Во-вторых, положение участка  $и-к-л$  будет более высоким, что свидетельствует о большей величине недоуплотнения и просадочности.

Итак, наиболее просадочные золовые лёссовые породы формируются при небольшом увлажнении осадка-породы. Даже однократное сильное их увлажнение резко снижает величину формирующегося недоуплотнения, а следовательно, и потенциальной просадочности. При многократном сильном увлажнении—высыхании пылеватых образований вследствие развития хотя и небольшой и уменьшающейся по величине с каждым циклом усадки (см. рис. 69, д) образуется (без воздействия других причин) незначительная по величине просадочность, которая может проявляться под действием собственного веса толщи.

С учетом эффектов “расшатывания” структуры грунта при циклическом увлажнении—высыхании, происходящих в периоды отсутствия осадконакопления, графическая модель формирования просадочности в легких лёссовидных суглинках представлена на рис. 69, е. Вследствие этого положение участка  $k-l-m$  будет более высоким по сравнению с участком  $u-k-l$  на рис. 69, в.

**Логико-графические модели формирования сингенетической просадочности делювиальных и пролювиальных лёссовых пород.** Образование толщ пылеватых делювиальных и пролювиальных отложений, так же как и эоловых, происходит путем последовательного наслоения одних элементарных слоев на другие. Отличие заключается, как показано в гл. 2 и 3, в двух главных особенностях: 1) при делювиальном и пролювиальном процессах формируется изначально полностью водонасыщенный пылеватый осадок; 2) мощность его слоя, накопленного за один этап осадконакопления, как правило, больше, чем у эоловых образований, и может достигать в пролювиальных шлейфах больших величин, вплоть до первых метров.

В ходе накопления осадков рассматриваемого генезиса, их высыхания в условиях аридного климата, последующего увлажнения после перекрытия новым слоем водонасыщенных образований, их совместного высыхания происходят процессы уплотнения, очень близкие к описанным ранее для эоловых лёссовых отложений. В этом случае также формируется разрыв во времени периода действия на пылеватые высохшие и уже упрочнившиеся породы возросшего давления от веса вышележащих образований и периода существования оптимальных по степени увлажнения условий их уплотнения. В итоге в ходе седиментации и раннего субаэрального литогенеза таких пылеватых образований формируются недоуплотненные толщи лёссовых делювиальных или пролювиальных отложений, которым свойственна сингенетическая просадочность.

Это сходство позволило Н.Я. Денисову, а затем и нам использовать обобщенные модели, приведенные на рис. 63, для описания формирования сингенетической просадочности делювиальных и пролювиальных отложений; при этом предполагается, что в точке  $a$  кривых находится изначально полностью увлажненный грунт. Однако здесь не учтено, что после накопления элементарного слоя высоковлажных пролювиальных осадков начинается его подсыхание и, следовательно, снижение давления от собственного веса грунта. Поэтому более правильным, на наш взгляд, будет изображение этой ситуации и процесса на рис. 70, где в точке  $a$  находится полностью увлажненный грунт.

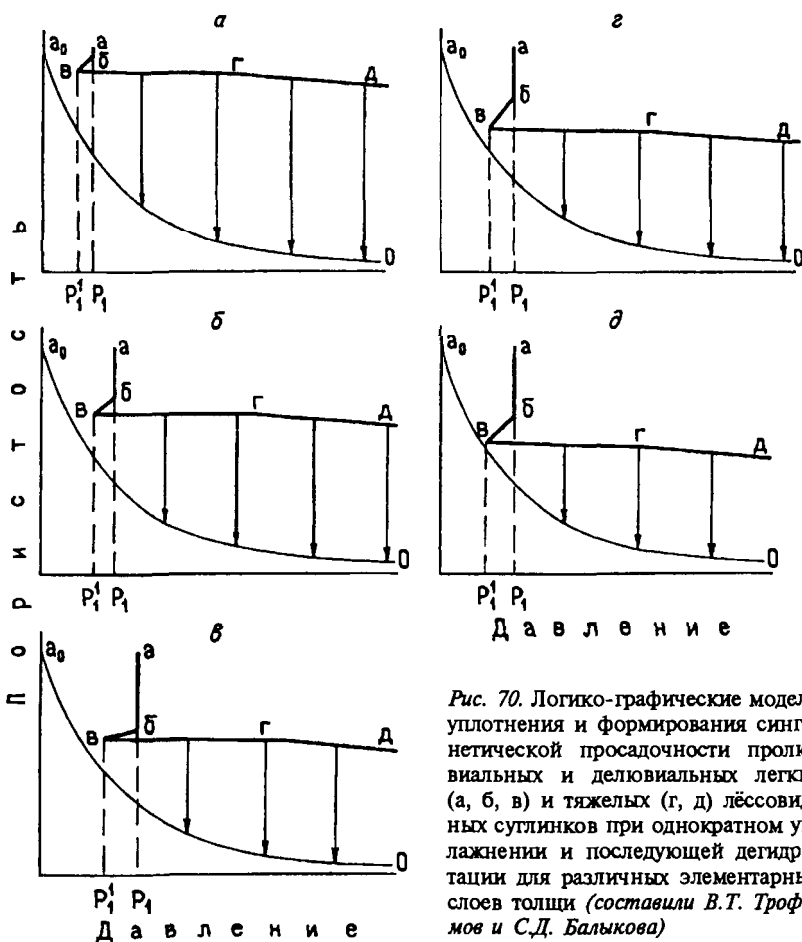


Рис. 70. Логико-графические модели уплотнения и формирования сингенетической просадочности пролювиальных и делювиальных легких (а, б, в) и тяжелых (г, д) лёссовидных суглинков при однократном увлажнении и последующей дегидратации для различных элементарных слоев толщи (составили В.Т. Трофимов и С.Д. Балыкова)

Необходимо отметить, что в случае пролювиальных отложений за один этап может накопиться мощная толща осадков. Поэтому уплотнение осадков в верхней и нижней частях элементарного слоя будет происходить по-разному. На рис. 70, а—в показано уплотнение и формирование сингенетической просадочности пролювиальных легких лёссовидных суглинков в верхней, средней и нижней частях элементарного слоя. В первом случае (рис. 70, а) давление от собственного веса грунта мало; поэтому подсыхание осадка не приведет к значительному снижению пористости ни в период высокой влажности (отрезок *аб*), ни в период его дегидратации за счет осадки и усадки (отрезок *бв* субгоризонтален). В нижней части осадок находится более длительное время в сильновлажном состоянии, поэтому его

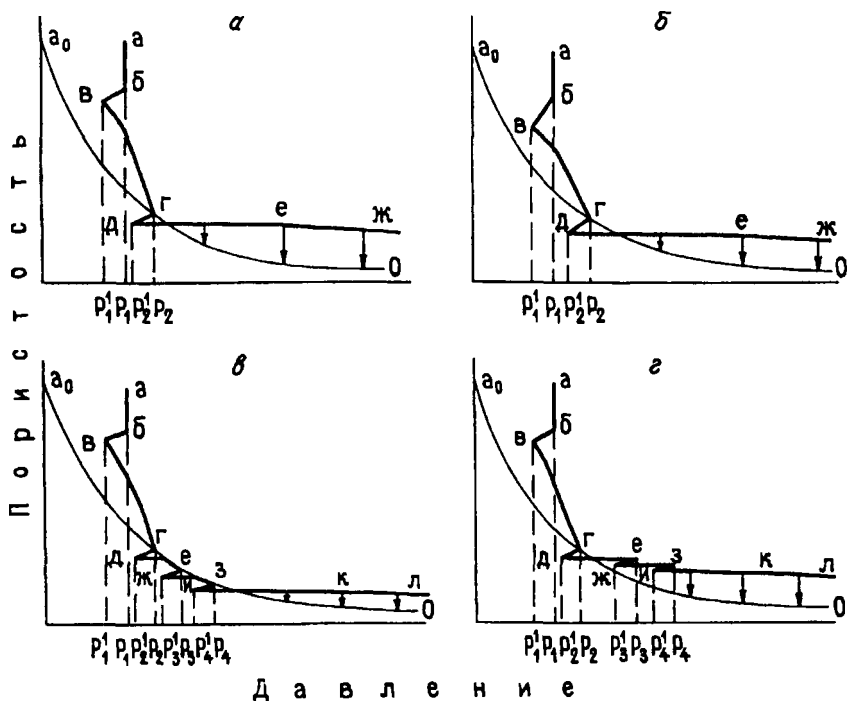


Рис. 71. Логико-графические модели уплотнения и формирования сингенетической просадочности пролювиальных и делювиальных легких (а, в, г) и тяжелых (б) лёссовидных суглинков при разных режимах двукратного (а, б) и многократного (в, г) увлажнения и последующей дегидратации элементарного слоя (составили В.Т. Трофимов и С.Д. Балькова)

уплотнение идет более активно (рис. 70, в). На рис. 70, б представлена модель уплотнения осадка в средней части или при небольшой мощности элементарного слоя. Добавим, что если время нахождения осадка в водонасыщенном состоянии равно времени консолидации, то точка б будет располагаться на кривой  $a_0o$ .

Главные отличия в формировании просадочности слоя средне- и тяжелосуглинистого состава в ходе однократного цикла увлажнения—высушивания заключаются в более активном их уплотнении под собственным весом, существенно большем уплотнении за счет усадки, что приводит к формированию меньшей величины просадочности (рис. 70, г, д).

Число моделей формирования просадочности пролювиальных отложений существенно меньше по сравнению с эоловыми, поскольку, по существу, исключается ситуация уплотнения слабо или первоначально не полностью увлажненных систем. Все

модели, рассмотренные выше для первоначально сильно увлажненных и позже вторично или многократно сильно увлажняемых эоловых образований, оказываются справедливыми для делювиальных и пролювиальных отложений соответствующего гранулометрического состава. И это подтверждено лабораторными экспериментами В.С. Бондаренко, Н.Н. Комиссаровой, Н.В. Колмийцева и В.Т. Трофимова.

Кроме того, необходимо подчеркнуть, что для отложений этого генезиса модели, описывающие формирование просадочных свойств лёссовых пород при двукратном сильном увлажнении и последующем высыхании (рис. 71), должны реализоваться более часто по сравнению с эоловыми образованиями.

Существенное влияние на изменение пористости делювиальных и пролювиальных отложений оказывают процессы циклического набухания при увлажнении атмосферны-

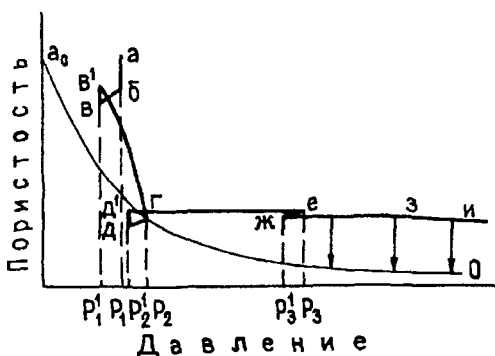


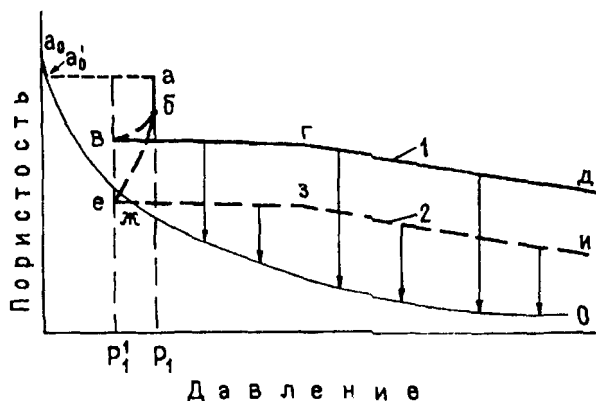
Рис. 72. Логико-графическая модель формирования сингенетической просадочности пролювиальных лёссовых пород с учетом эффектов расшатывания" структуры грунта при их увлажнении-дегидратации (составили В.Т. Трофимов и С.Д. Балыкова)

ми осадками и усадки при дегидратации образований, залегающих в приповерхностной части разреза. В итоге пористость системы уменьшается более медленными темпами (сравни рис. 71, 72).

**Логико-графическая модель формирования сингенетической просадочности отложений, накопившихся в чаше водохранилища.** Формирование сингенетической просадочности у пылеватых осадков, образовавшихся на склоне чаши водохранилища аридной зоны с большой сработкой уровня воды, после их выхода из-под уровня воды и раннего субаэрального диагенеза в условиях жаркого летне-осеннего времени описано автором данной книги, В.С. Бондаренко и Н.А. Румянцевой (Трофимов, Бондаренко, Румянцева, 1987). После накопления осадков элементарного слоя на субгоризонтальных площадках чаши водохранилища они практически не уплотняются в подводных условиях вследствие короткого срока жизни и малого значения эффективного давления (отрезок  $a_0 - a'_0$  на рис. 73). Когда уро-

вень водохранилища понизится и осадок переходит в субаэральные условия, он испытывает раннедиагенетические преобразования: сначала небольшое уплотнение в сильно увлажненном состоянии вследствие некоторого возрастания эффективного давления ( $P_1$  на рис. 73, отрезок  $a-b$ ), затем замедленное уплотнение от веса пород при достаточно быстром снижении влажности сопровождаемое усадкой (отрезок  $b-e$ ).

Рис. 73. Логико-графическая модель уплотнения и формирования сингенетической просадочности пылеватых отложений, накопившихся на склоне чаши водохранилища с большой сработкой в аридных условиях



Усадка пылеватых образований, формирующихся за счет переотложения более древних лёссовых пород, как правило, небольшая и породы сохраняют высокую пористость. В этом случае они дают просадку при природной нагрузке. Если же усадка существенна (кривая 2), то молодая порода в этом состоянии является переуплотненной и просадочные свойства под природной нагрузкой проявлять не может. Если же на нее передавать дополнительное давление, превышающее критическое значение в точке  $e$ , то после увлажнения просадочность будет проявляться.

Описанный механизм возникновения сингенетической просадочности водных отложений симптоматичен, как уже отмечалось нами (Трофимов и др., 1987), тремя главными особенностями: 1) огромной скоростью формирования просадочных пород в объеме элементарного слоя; 2) возможностью образования в аридных условиях просадочных при дополнительных нагрузках пылеватых пород “озерного” генезиса, причем их просадочность по своей природе является сингенетической; 3) возможность образования просадочности без какого-либо действия криогенного фактора (за время, прошедшее с момента выхода осадка из-под уровня воды, его осушения и формирования просадочности, температуры грунтов и воздуха в районе развития таких пород были положительными).

### Логико-графические модели формирования эпигенетической просадочности лѣссовых пород элементарного слоя

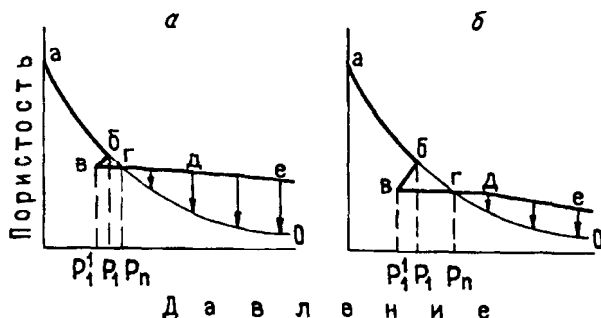
**Логико-графические модели формирования эпигенетической просадочности аллювиальных лѣссовых пород.** Образование просадочности этих отложений, как уже отмечалось ранее, идет принципиально иным путем в ходе прогрессивного литогенеза. Если в эоловых, делювиальных и пролювиальных лѣссовых породах она формируется в ходе накопления толщ на пути превращения осадка в породу, то у аллювиальных отложений просадочность возникает вследствие изменения термовлажностных условий уже после завершения их осадконакопления и превращения в высокопористую сильно увлажненную нормально уплотненную породу (преимущественно скрыто- и линзовидно-слоистых микрофаций аллювия) в условиях поймы. В силу этого первые (эоловые, делювиальные и пролювиальные) отложения в подавляющем большинстве разрезов могут проявлять просадочные свойства под действием собственного веса толщи (он может существенно возрасти в ходе продолжающегося осадконакопления), а вторые (аллювиальные) этой особенностью (в большинстве случаев) не обладают и могут реализовать просадочность только под дополнительной нагрузкой.

Формирование эпигенетической просадочности аллювиальных пород в ходе прогрессивного литогенеза обусловлено сочетанием таких процессов: накопления полностью водонасыщенного пойменного пылеватого осадка небольшой мощности в подводной обстановке — уплотнения этого сильно увлажненного осадка под действием собственного веса (по кривой полного соответствия пористости действующему давлению) на пути его преобразования и сильно увлажненную аллювиальную породу в разрезе поймы — усадки этой породы в ходе дегидратации в субаэральных условиях после перехода ее в разрез более высокого геоморфологического элемента — уплотнения маловлажной аллювиальной пылеватой породы под дополнительной нагрузкой (от веса возведенного сооружения или вследствие иной причины).

Первая логико-графическая модель формирования просадочности лѣссовых пород этого генетического типа составлена Н.Я. Денисовым (см. рис. 16). Более точно все описанные процессы отражены на рис. 74, б. Ведь при подсыхании пылеватых сильно увлажненных аллювиальных пород после перехода в условиях надпойменной террасы наблюдается усадка, хоть и

небольшая по величине (отрезок  $б-в$ ). Одновременно давление на элементарный слой уменьшается до  $P_1^1$  вследствие дегидратации толщи. При последующем уплотнении под дополнительной нагрузкой на отрезке  $в-г$  порода будет переуплотненной, а на участке  $г-д-е$  — эпигенетически недоуплотненной по отноше-

Рис. 74. Логико-графические модели уплотнения и формирования эпигенетической просадочности аллювиальных отложений для легких (а), средних и тяжелых (б) лёссовидных суглинков, Трофимов (1990)



нию к действующей нагрузке и обладать потенциальной просадочностью (рис. 74).

Влияние гранулометрического состава аллювиальных отложений на формирующуюся величину просадочности столь же существенно, как и у других генетических типов отложений. Вследствие большей величины усадки у средних и тяжелых лёссовидных суглинков и тут образуется при отсутствии иных процессов меньшая по значению просадочность по сравнению с аллювиальными легкими лёссовидными суглинками (см. рис. 74).

**Логико-графические модели формирования эпигенетической просадочности при гипергенном преобразовании пород.** Образование просадочности за счет гипергенного преобразования — разупрочнения и дегидратации — пород разного возраста и генезиса доказано экспериментальными работами. Этот процесс в литературе получил название “облессование”. Наиболее активно он протекает в пылеватых связных грунтах озерно-аллювиального и аллювиального генезиса; в ледниковых отложениях облессование развивается менее интенсивно.

Графическая модель современного облессования и формирования эпигенетической просадочности у пылеватых дисперсных пород различного состава в гумидной зоне предложена нами и В.С. Бондаренко (Трофимов, Бондаренко, 1983а). В этих климатических условиях в плакорной обстановке уплотнение практически полностью водонасыщенных или сильно увлажненных отложений разного генезиса под действием вышележащих пород в разрезе надпойменных террас и междуречных рав-



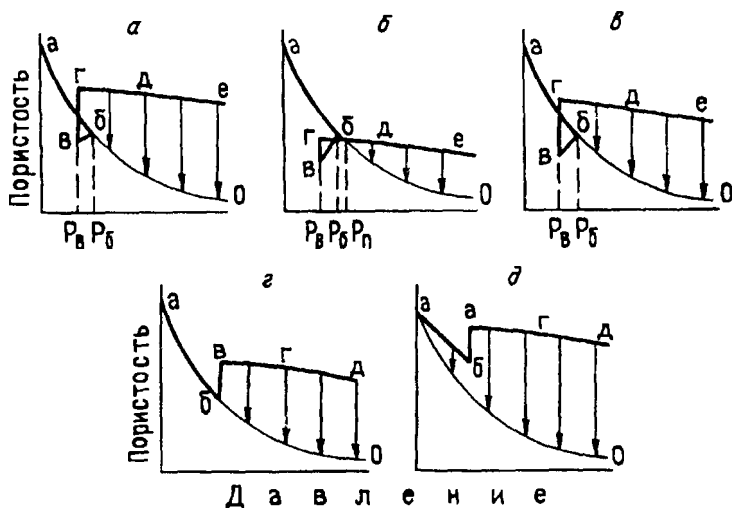


Рис. 75. Логико-графические модели уплотнения и формирования эпигенетической просадочности в ходе гипергенного разуплотнения элементарного слоя пылеватых пород легкого состава (а) и высоко дисперсных грунтов (б — для основной слабо разуплотненной части массива, в — для прибровочной, интенсивно разуплотняемой его части) в гумидных (а—в) и аридных (г—д) условиях (по В.Т. Трофимову и В.С. Бондаренко, 1983; В.Т. Трофимову, 19906)

нин идет по кривой нормального уплотнения (отрезок  $a-b$  на рис. 75). Изменение влажности этих, как правило, высокопористых пород вследствие улучшения дренированности территории (например, в пределах прогрессивно дренируемых, подрабатываемых эрозией массивов) вызывает усадку и уменьшение их пористости, что иллюстрируется отрезком  $b-v$  рис. 75 (снижение давления с величины  $P_b$  до  $P_v$  обусловлено только уменьшением влажности толщи). Величина этого отрезка для пород легкого состава, как и во всех ранее рассмотренных случаях, небольшая, а для средних и тяжелых суглинков значительная. В этом состоянии маловлажные пылеватые породы при увлажнении под бытовой нагрузкой не только не проседают, а, наоборот, набухают, что наиболее отчетливо выражено у высокодисперсных образований.

Дальнейшее развитие процесса выветривания (дегидратация пород лишь первая его составляющая) приводит к прогрессивной необратимой агрегации частиц и, главное, к разуплотнению пород вследствие циклического изменения термовлажностного режима толщи, а в самой верхней ее части — и под влиянием сезонного промерзания и протаивания. На модели это иллюстрируется вертикальным отрезком  $v-z$  (рис. 75). Его величина

во многом зависит от гранулометрического состава пород и времени действия процессов, обуславливающих облёссование пород. В разрезах, сложенных лёссами и легкими лёссовидными суглинками, разуплотнение идет, как показывают экспериментальные данные, полученные непосредственно в массивах, интенсивно, и точка  $z$  через относительно короткий срок (порядка 8—10 лет) будет находиться выше кривой нормального уплотнения. Облёссованная порода в этом состоянии при замачивании дает просадку как под дополнительной нагрузкой, так и под собственным весом толщи (рис. 75, а).

Разрезы, сложенные высокодисперсными пылеватыми породами, наоборот, из переуплотненного состояния (точка  $в$ ) выходят под воздействием выветривания очень медленно. Поэтому точка  $z$  отрезка  $в—z$  по истечении того же срока будет, как правило, находиться для подавляющей части толщи ниже кривой нормального уплотнения (см. рис. 75, б). В этом состоянии просадка при замачивании наблюдается только под дополнительной нагрузкой, которая должна превысить некоторую критическую величину ( $P_n$  на рис. 75, б), свойственную данной стадии разуплотнения рассматриваемой породы.

В прибровочной части таких разрезов разуплотнение пород идет более быстрыми темпами. В соответствии с этим точка  $z$  при благоприятном ходе процесса может за этот же промежуток времени оказаться чуть выше кривой нормального уплотнения. В этом случае облёссованная порода при замачивании будет давать просадку как под дополнительной нагрузкой, так и под собственным весом толщи (см. рис. 75, в). Однако величина просадочности в последнем случае будет, как правило, небольшой.

Следует подчеркнуть, что в ходе геологического развития территории процессы облёссования действуют при благоприятных условиях постоянно и охватывают все более и более глубокие горизонты ранее уплотненных под влиянием усадки высокодисперсных пород. И в случае отсутствия сноса разуплотненного материала с поверхности склона даже в гумидных условиях может сформироваться достаточно мощная приповерхностная зона просадочных облёссованных средних и тяжелых суглинков.

В *аридных условиях* формирование просадочности за счет развития процессов выветривания отложений различного состава, возраста и генезиса также протекает достаточно активно. Облёссованию здесь подвергаются породы, имеющие невысокую естественную влажность. Оно развивается в имеющих разное

состояние образования: и в переуплотненных, и в нормально уплотненных, и в недоуплотненных породах.

Первые формируются при диагенезе первоначально водонасыщенных отложений пылеватого состава различного генезиса. Последующее воздействие процессов выветривания, приводящее к облессованию их толщ, начинается в позиции, обозначенной на рис. 75, а точкой *в*. Сам же процесс облессования полностью соответствует закономерностям, показанным на рис. 75 для пород различного гранулометрического состава.

Разуплотнение в ходе выветривания ранее нормально уплотненных пылеватых пород, которые обычно образуются в ходе диагенеза отложений с разным, но далеко не полным водонасыщением, происходит по модели, показанной на рис. 75, г. В этом случае в облессованных образованиях формируется эпигенетическая просадочность, проявляющаяся как под собственным весом толщи, так и при дополнительных нагрузках. Величина отрезка *б—в* и в этой ситуации определяется гранулометрическим составом выветривающихся пород и временем действия процессов их облессования.

Еще более широко в аридной зоне протекает выветривание недоуплотненных пород, которые формируются разными ранее охарактеризованными путями. За счет этого пористость пород еще больше возрастает (см. рис. 75, д) точно так же, как и их просадочность. По существу, в этом случае сингенетическая просадочность различных по генезису отложений возрастает за счет эпигенетической, образовавшейся в ходе гипергенеза.

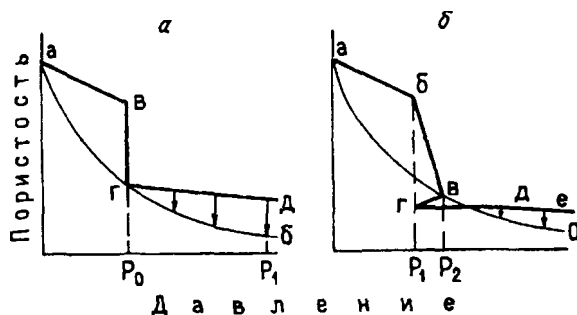
Воздействие процессов выветривания на недоуплотненные, обладающие сингенетической просадочностью лёссовые породы не только увеличивает ее величину, но и делает более сложной ее природу. В зоне влияния гипергенных факторов генезис становится эпи-сингенетическим или сингенетически-эпигенетическим. Именно таковой является просадочность во многих частях разрезов циклически построенных толщ эоловых и пролювиальных лёссовых пород: в каждом седиментационном циклите в нижней и средней его частях просадочность является преимущественно сингенетическим свойством, а в верхней части, под современной или погребенной почвой, где произошло значительное усиление первичной просадочности за счет гипергенных процессов, — сингенетически-эпигенетическим.

**Логико-графические модели формирования вторичной эпигенетической просадочности лёссовых пород разного генезиса при техногенном воздействии.** В ходе инженерно-хозяйственного освоения в толще лёссовых пород может сформироваться вторичная эпигенетическая просадочность. Она возникает под влия-

янием дополнительных нагрузок от сооружений на лёссовые породы, самоуплотнение (реализация просадочных свойств) которых вследствие увлажнения (природного или антропогенного) под природной нагрузкой перед этим полностью закончилось.

На модели этого процесса, предложенной Н.Я. Денисовым (1953), естественное уплотнение лёссовых пород в условиях сухо-

Рис. 76. Логико-графические модели уплотнения и формирования вторичной эпигенетической просадочности просевших лёссовых пород при последующем их подсыхании под дополнительной техногенной нагрузкой, предложенные Н.Я. Денисовым (а) и В.Т. Трофимовым (б)



го климата при давлении  $P_0$  отражено отрезком  $а-в$  (рис. 76, а). При увлажнении этой толщи происходят просадка и уплотнение пород (отрезок  $в-г$ ). Если после их дегидратации на мало-влажных породах возводится инженерное сооружение (нагрузка возрастает до  $P_1$ ), то уплотнение пород под ним при сохранении их влажности происходит по линии  $г-д$ . Порода вновь становится недоуплотненной и обладает просадочными свойствами. Повторное увлажнение таких лёссовых пород приведет к проявлению повторных просадочных деформаций.

В более точном виде эта модель представлена на рис. 76, б. Ведь при увлажнении толщи лёссовых пород давление на рассматриваемый их слой за счет веса воды возрастает с  $P_1$  до  $P_2$  и кривая самоуплотнения за счет просадки должна прийти в точку  $в$ . При дегидратации толщи породы дадут очень небольшую усадку (отрезок  $в-г$ ). Форма кривой  $г-д-е$  обоснована выше (рис. 76).

**Логико-графическая модель формирования эпигенетической просадочности лёссовых пород за счет криоэпигенетическо-сублимационного механизма.** А.В. Минервин и Н.Н. Комиссарова предложили графическую модель формирования эпигенетической просадочности лёссовых пород при их эпигенетическом промерзании и разуплотнении (рис. 18). В увлажненном состоянии пористость соответствует давлению вышележащих пород (отрезок  $аб$ ). На каком-то временном отрезке существования уже сформировавшихся пород породы эпигенетически про-

мерзают, что сопровождается их криогенным разуплотнением (отрезок *ba* на рис. 18). Породы приобретают высокую пористость, становятся разуплотненными. Если такое состояние сохранится в процессе иссушения пород (например, вследствие сублимации льда), то сформируется эпигенетическая просадочность, которая будет реализована при последующем увлажнении пород.

## 5.4.

### О путях построения логико-графических моделей формирования просадочности лёссовых пород элементарного слоя с координатой времени

Ранее уже отмечалось, что одним из главных недостатков логико-графических моделей формирования просадочности лёссовых грунтов элементарного слоя описанного типа (в координатах “пористость — давление”) является отсутствие на них координаты времени. Это не позволяет непосредственно на модели отразить конкретный ход процесса во времени, что делается лишь косвенно через меняющиеся величины действующих на грунт-осадок и грунт-породу давлений (или влажности).

Б.Ф. Галай (1992) сделал попытку компенсировать этот недостаток логико-графических моделей формирования просадочности применительно к объему элементарного слоя лёссовых пород размещением под ось нагрузки на рассматриваемый слой (абсцисса) “поясняющих” изменение нагрузки графических данных, показывающих в упрощенном временном масштабе историю развития сложно

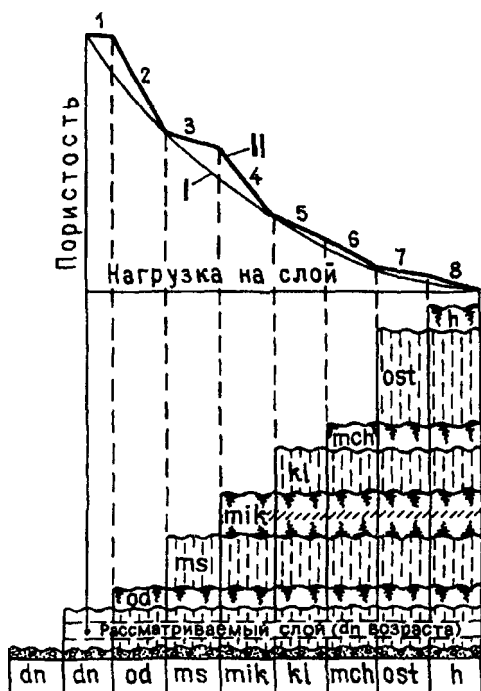


Рис. 77. Этапы (1—8) уплотнения и устранения просадочности в слое днепровского лёсса при накоплении разреза г. Георгиевска (кривая II). Кривая I — уплотнение лёсса при оптимальных условиях (по Б.Ф. Галаю, 1992)

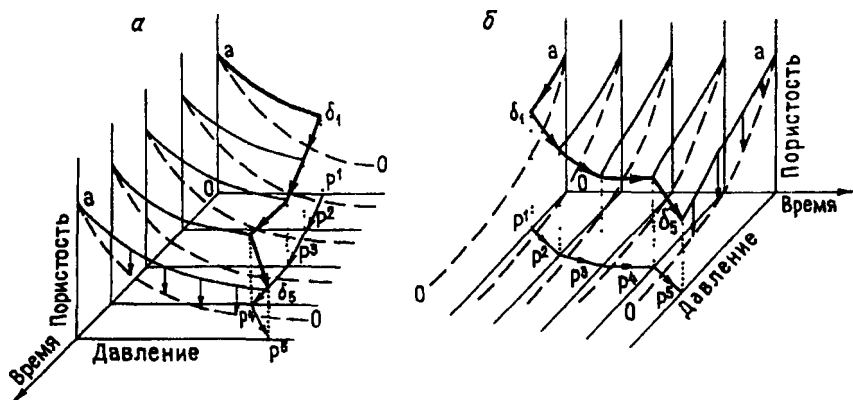


Рис. 78. Логико-графические модели уплотнения и формирования просадочности лёссовых грунтов элементарного слоя в координатах “пористость — давление (нагрузка) — время” (два варианта).  $P^1, P^2, \dots, P^5$  — “обобщенная” нагрузка на грунт рассматриваемого элементарного слоя от веса вышележащих образований; ее изменение при увлажнении и дегидратации грунта и этих образований не показано (по В.Т. Трофимову, 1998а)

построенной перекрывающей толщи. Такой подход реализован им в модели уплотнения, формирования и устранения просадочности в слое лёсса днепропетровского горизонта при накоплении толщи лёссовых грунтов разреза территории г. Георгиевска (рис. 77).

Более перспективным, но, к сожалению, более сложным для визуального восприятия является иной способ создания логико-графических моделей формирования просадочности лёссовых грунтов, основанный на использовании специально вводимой координаты времени. Использование в системе прямоугольных координат третьей координаты, координаты времени, с одной стороны, устраняет ранее названный очень существенный недостаток описанных ранее логико-графических моделей, а с другой — придает им принципиально новое содержание. Последнее обусловлено тем, что реализуется возможность более точного и более конкретного отображения не только особенностей формирования “первичной” просадочности, но и получения наглядного визуального представления о дальнейшей ее трансформации в ходе дальнейшей геологической жизни рассматриваемого элементарного объема лёссового грунта в разрезе толщи.

На рис. 78 показаны основы одного из подходов к созданию логико-графической модели формирования просадочности лёссового грунта, реализующего изложенную идею. Вид моделей на рис. 78 и ход кривой изменения пористости лёссового грун-

та во многом непривычен тем, кто занимается грунтоведением. Но главное не в этом, а в том, что создание модели подобного типа требует реальных данных о закономерностях формирования и последующей трансформации просадочности во времени. А рассмотрение таких задач инженеры-геологи, как правило, “опускают” даже при решении теоретических генетико-возрастных ретроспективных задач. Это обусловлено тем, что мы во многом просто не подготовлены к их решению, хотя такие задачи сугубо инженерно-геологические.

## 5.5.

### **Логико-графические модели формирования просадочности толщи лёссовых пород**

Более сложной является задача построения графических моделей формирования просадочности толщи лёссовых пород. На рис. 79 представлены результаты такой попытки, предпринятой А.В. Минервиным для разреза “Отказное” Терско-Кумской впадины. Им выделено девять этапов в зависимости от характера (направленности) новейших тектонических движений, фациальных, экологических и палеогидрогеологических условий, палеогеографических (главным образом палеоклиматических) обстановок. Однако здесь рассматривается история формирования просадочности для отдельных горизонтов лёссовых пород (соответствующих рассматриваемому в данный момент этапу) и не анализируется, что же происходит с просадочными свойствами ранее отложенных слоев.

В принципе создание логико-графических моделей уплотнения и формирования просадочности лёссовых пород применительно к объему толщи — проблемная задача и в целом задача дальнейших исследований. До сих пор не созданы такие реальные модели не только к условиям сложно, циклично построенных толщ, но и к обстановкам простых по строению толщ. И это не случайно, так как разработка таких моделей — действительно проблемная задача, от решения которой мы долгие годы явно уходили, используя более “привычные” и менее обязывающие вербальные модели. Выскажем в связи с этим основные позиции к решению названной задачи.

В принципе толщу лёссовых грунтов можно представить как сочетание определенного для каждой толщи количества элементарных слоев таких грунтов. Из этого следует, что в идеале логико-графическую модель формирования просадочности толщи лёссовых грунтов можно создать как сочетание определенного количества логико-графических моделей формирования проса-

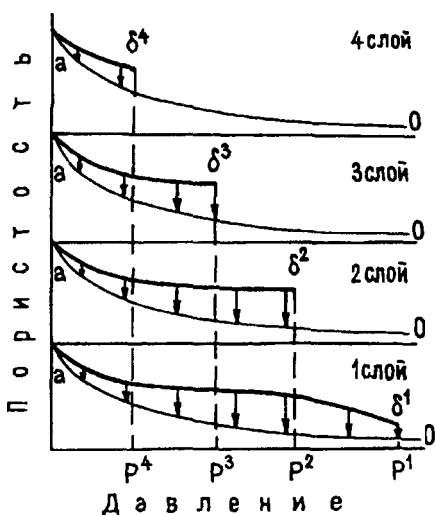




дочности лёссовых грунтов элементарных слоев. Однако реализация такого, в принципе, единственного корректного подхода вызывает определенные трудности. В дополнение к сложностям, связанным с необходимостью показа динамики изменения просадочности во времени, встает вопрос о том, каково это “определенное количество... элементарных слоев”, как их выбрать, выделить для построения модели толщи. Особенно остро эти вопросы встают при анализе мощных циклически построенных толщ лёссовых пород, включающих 4—6 и более циклитов, каждый из которых содержит в качестве составных элементов горизонт лёссовых пород и венчающую их погребенную или современную почву.

Ответ на этот вопрос, с нашей точки зрения (Трофимов, 1998а), включает две традиционные для геолога позиции. Первая из них должна регламентироваться тем, что и с какой деятельностью мы хотим отобразить в модели. Вторая определяется уровнем наших знаний об объеме — истории его геологического, точнее сказать, истории инженерно-геологического развития. Иначе говоря, принятие автором самостоятельных геологических решений, как правило, решений волюнтаристских, но геологически обоснованных по обоим позициям, неизбежно.

Логико-графическую модель формирования просадочности относительно однородной толщи лёссовых грунтов, включающую только один циклит, особенно для этапа осадконакопления и его (осадка) первичной дегидратации, действительно можно создать как сочетание аналогичных моделей ее элементарных слоев. На рис. 80 показана такая модель как сочетание моделей



четырех слоев: первого — залегающего в нижней части толщи, второго и третьего — залегающих в средней ее части, но на разной глубине и четвертого — в верхней ее части. На этой модели можно также отразить суммарное воздействие последующих гипергенных процессов на состояние грунта, обуславливающих неодинаковое их раз-

Рис. 80. Логико-графические модели уплотнения и формирования просадочности лёссовых грунтов однородной по строению толщи (по В.Т. Трофимову, 1998а)

плотнение на разных глубинах. Однако динамику его изменения мы отобразить уже не можем, поскольку в такой модели нет координаты времени. Для решения этого вопроса можно использовать подход с введением специальной координаты времени, основы которого изложены в разделе 5.4.

Создание логико-графических моделей формирования циклически построенной толщи — задача более сложная, особенно если учесть, что реальная нагрузка на нижележащие циклиты менялась неоднократно вследствие абсолютного увеличения веса от вышележащих образований на этапе осадконакопления и увлажнения осадка и на этом фоне последующего его снижения после дегидратации вновь сформировавшегося циклита. В связи с этим при построении таких моделей приходится взаимосвязанно учитывать такие позиции: 1) особенности изменения пористости (коэффициента пористости) для грунтов каждого циклита как на этапе образования слагающих его пылеватых осадков-пород, так и во время перерыва осадконакопления, в период формирования почвы, которая становится погребенной при следующем осадконакоплении; 2) особенности уплотнения от весового воздействия каждого нового образовавшегося циклита лёссовых грунтов на нижележащие; 3) особенности проявления первых двух позиций во времени. Даже если представить на логико-графической модели каждый циклит только одной кривой реального уплотнения, то для сложнопостроенной толщи такая модель неизбежно является непростой.

Модель, на примере абстрактного разреза эоловых лёссовых грунтов реализующая изложенный подход, приведена на рис. 81. На ней показано формирование просадочности лёссовой толщи, состоящей из четырех циклитов, причем совершенно сознательно выбрана ситуация, когда каждый циклит имеет одинаковые состав твердой компоненты и тип почвы, мощность лёссовых пород и погребенной почвы, одинаковую исходную пористость. В модели заложена разная продолжительность этапов перерыва осадконакопления и, следовательно, продолжительность этапов гипергенного преобразования ранее сформировавшихся лёссовых пород, в том числе и под влиянием процессов почвообразования.

Подчеркнем, что на рис. 81, а под осью нагрузки на модели помещена относительная своеобразная временная информация, позволяющая четко выделить периоды осадконакопления и периоды его перерыва, что позволяет более четко представить причинный ход кривой реального уплотнения. При этом периоды осадконакопления ( $t_1$ ,  $t_3$ ,  $t_5$  и  $t_7$ ) действительно показаны как определенный интервал времени, а периоды его прекращения

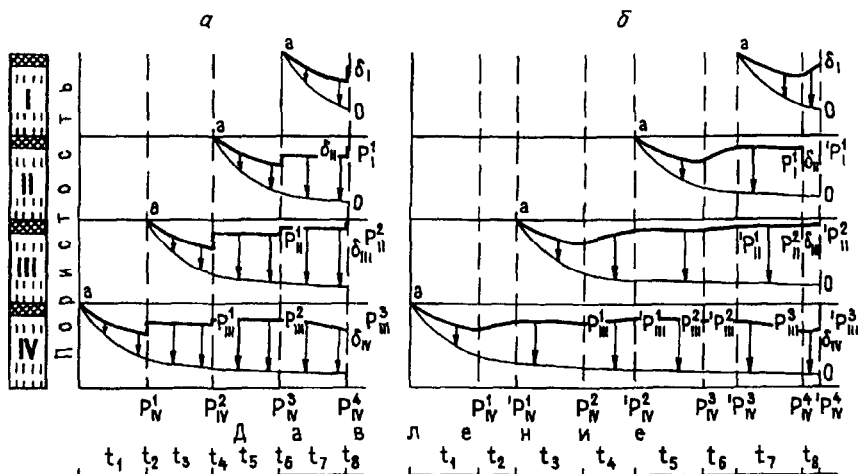


Рис. 81. Логико-графические модели уплотнения и формирования просадочности лёссовых грунтов циклично построенной толщи (пояснения в тексте).  $t_1, t_3, t_5$  и  $t_7$  — периоды осадконакопления;  $t_2, t_4, t_6$  и  $t_8$  — периоды перерыва осадконакопления, почвообразования и гипергенного разуплотнения пород;  $P_1, P_2, \dots, P_n$  — давление на рассматриваемый слой лёссовых пород в увлажненном состоянии толщи или отдельных ее циклитов;  $^1P_1, ^1P_2, \dots, ^1P_n$  — давление на тот же слой в период дегидратации толщи или вновь образованных циклитов (по В.Т. Трофимову, 1998а)

( $t_2, t_4, t_6$  и  $t_8$ ) — как точки на оси времени. Вертикальные отрезки в изменении пористости, приходящиеся на этапы перерывов осадконакопления, соответствуют гипергенному разуплотнению лёссовых пород в периоды почвообразования. Более интенсивное уплотнение маловлажных лёссовых пород слоя IV на временном отрезке  $t_7$  обусловлено “ломкой” их структурных связей под весом вышележащих пород в период накопления самого верхнего слоя осадков данного разреза. Обратим также внимание, что на рис. 81, а не отражено изменение веса пород толщи, связанное с увлажнением-дегидратацией каждого накапливающегося слоя.

На рис. 81, б по оси абсцисс, по существу, совмещено изменение нагрузки от вышележащих грунтов и время осадконакопления и его перерывов. Представляется, что такой вариант построения модели, с учетом абсолютной или относительной продолжительности этих временных интервалов, позволяет получить более наглядную информацию.

Приведенные логико-графические модели формирования просадочности толщ лёссовых пород, строго говоря, построены без специальной оси времени. Ее введение в модель, безусловно, сделает последнюю более информативной, но и более

трудной для построения и восприятия. Реализация такого подхода может быть осуществлена на основе идеи, изложенной ранее.

В заключение поставим один вопрос, который, с нашей точки зрения, неизбежно должен возникнуть у критически читающего работу исследователя: "Зачем все это нужно, тем более что автор неоднократно подчеркивает сложности в решении задачи?" Ответ на этот вопрос включает следующие три позиции. Решение поставленной проблемной задачи необходимо: 1) для дальнейшего развития теории генетического грунтоведения в целом; 2) для развития действительно генетического изучения закономерностей формирования просадочности лёссовых грунтов как свойства, образовавшегося как на этапе накопления осадка и его раннего преобразования в породу в субаэральных условиях, так и в ходе последующего развития толщ горных пород; 3) для поиска новых подходов к изучению формирования просадочности лёссовых грунтов с целью решения неизбежно возникающих при построении логико-графических моделей принципиально новых вопросов, в частности комплексирования методов абсолютного датирования, изотопии, детального изучения спорово-пыльцевых комплексов, которые сейчас используются инженерами-геологами лишь эпизодически. Иначе говоря, построение логико-графических моделей формирования толщ лёссовых грунтов позволяет нам понять действительный уровень наших знаний об изученном объекте (может быть, уровень нашего незнания об объекте) и целенаправленно сформулировать задачи дальнейших исследований.

## ОСНОВЫ ЧАСТНЫХ И ОБЩЕЙ ТЕОРИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСАДОЧНОСТИ ЛЁССОВЫХ ПОРОД

---

### 6.1.

#### Общие замечания о типе формулируемых теорий

В своем развитии научная идея о каком-либо объекте материального мира, сформулированная исследователем, проходит ряд стадий. Идея, высказанная в виде предположения, может стать основой для построения научной гипотезы. Последняя, строго говоря, представляет собой выраженное в форме суждения предположение (или предугадывание) причинной связи явлений (БСЭ, т. 6).

Научная гипотеза как своеобразный исходный момент исследования должна обладать рядом определенных качеств: 1) быть логически непротиворечивой; 2) обладать определенной общностью и предсказательной силой; 3) быть проверяемой. Все описанные ранее гипотезы о формировании просадочности лёссовых пород отвечают, с нашей точки зрения, хотя и в разной степени, этим требованиям. Все они в форме предположения описывают связь между просадочностью как наблюдаемым явлением и формирующим их процессом ("производящей их основой"). Гипотезы этого типа являются объяснительными.

"Превращение гипотезы в достоверную теорию связано с доказательством идеи, лежащей в ее основе. Когда наука и практика установят объективную истинность идеи, лежащей в основе гипотезы, последняя, путем ее конкретного развития, становится достоверной теорией" (Философская энциклопедия, т. 2, с. 237).

В теории познания подчеркивается, что гипотеза, выдвинутая как предположение, проходит в своем развитии ряд стадий. Важнейшей из них является проверка гипотезы — сопоставление

полученных из гипотезы следствий с опытом, данными экспериментов. Один из путей такой проверки — прямое наблюдение в тех или иных условиях той скрытой причины, о которой было высказано предположение в гипотезе. Именно он (этот путь) применяется к проверке гипотез о единичных явлениях. Доказанная гипотеза уже не может быть отброшенной в данной науке.

Следует подчеркнуть, что доказательство гипотезы и ее превращение в теорию нельзя представить как единичный акт. Процесс практического подтверждения гипотезы — это сложный и многосторонний процесс (Философская энциклопедия, т. 1, 1960). Этой позиции, с нашей точки зрения, и отвечает история экспериментального доказательства различных гипотез формирования просадочности лёссовых пород.

Теория — высшая форма научного знания. В общем виде, по В.С. Швыряеву, она представляет собой систему взглядов, направленную на истолкование и объяснение каких-либо явлений. По М. Поповичу и М. Садовскому, теория “форма достоверного научного знания о некоторой совокупности объектов, представляющих собой систему взаимосвязанных утверждений и доказательств и содержащая методы объяснения и предсказания явлений данной предметной области” (Философская энциклопедия, т. 5, 1970). Еще более четкую формулировку приводит П.В. Копнин (1968): “Теория — система научного знания, описывающая и объясняющая некоторую совокупность явлений, дающая знание реальных оснований и сводящая открытые в данной области закономерные связи к единому объединяющему началу” (с. 217).

В структуре теорий обычно выделяют ряд составляющих их компонент: “1) исходную эмпирическую основу, которая включает множество зафиксированных в данной области фактов и требующих теоретического объяснения; 2) исходную теоретическую основу — множество первичных допущений, постулатов, аксиом, общих законов теории, в совокупности описывающих идеализированный объект; 3) логику теории — множество допустимых в рамках теории правил логического вывода и доказательства; 4) совокупность введенных в теории утверждений с их доказательствами, составляющих основной массив теоретического знания” (БСЭ, т. 25, с. 435).

Оценивая всю совокупность данных, приведенных в главах 1—5, можно констатировать, что многие из этих компонент уже четко сформулированы, обеспечены в качестве доказательства экспериментальными фактами и логико-графическими моделями. Необходимо свести их воедино, четко обозначить совокуп-

ность утверждений, которые составят основу теоретического знания в теории формирования просадочности лёссовых пород в целом и просадочности лёссовых пород разных генетических типов в отдельности. Такие теоретические построения относятся к теориям описательным. Перед теорией этого типа в качестве главной задачи стоит упорядочение причинных и следственных фактов, к ней относящихся.

М. Попович и М. Садовский подчеркивали, что законы, формируемые в теориях этого типа, представляют собой генерализацию эмпирического материала и вводятся в теорию не в начальных пунктах, а в зависимости от потребности развития теории. "Описательные теории носят по преимуществу качественный характер. В них обычно не формулируются явным образом правила использования логики и не проверяется корректность приводимых доказательств. Эти теории формируются в обычных естественных языках с привлечением лишь специальной терминологии соответствующей области знаний" (Философская энциклопедия, т. 5, 1970, с. 206).

Ранее отмечалось, что полученные данные позволяют сформулировать основные положения частных и общей теорий формирования просадочности лёссовых пород. Первые, которых может быть несколько, в качественных категориях с использованием инженерно-геологической терминологии описывают и объясняют в единой системе представлений причинно-следственные связи процесса формирования просадочности лёссовых пород разных генетических типов, точнее, определенного генетического их типа в каждой такой теории. Общая же теория должна в тех же качественных категориях целостно описать и объяснить процесс формирования просадочности лёссовых пород как полигенной совокупности пород, которые сформировались, а затем и развивались в различных геологических и климатических условиях.

## 6.2.

### **Основные положения частных теорий формирования просадочности лёссовых пород различных генетических типов**

**Основные положения теории формирования просадочности лёссовых пород эолового генезиса.** В структуре этой частной теории в качестве составляющих выступают следующие компоненты:

- 1) многочисленные экспериментальные данные о просадочности лёссовых пород, которые большинство геологов отно-

сят к эоловым (именно эти данные представляют собой исходную эмпирическую основу, которая требует теоретического объяснения по типу “явление (просадочность) — причина (ее генезис)”);

- 2) исходная теоретическая основа — гипотеза Н.Я. Денисова о формировании просадочности эоловых лёссовых пород элементарного слоя с ранее рассмотренными постулатами и допущениями, описывающими процесс накопления и литификации первоначально воздушно-сухого пылеватого эолового осадка;
- 3) многочисленные экспериментальные данные, полученные разными авторами на различных образцах в процессе физического, преимущественно лабораторного моделирования, доказавших работоспособность указанной гипотезы и позволивших оценить роль состава осадка и условий, при которых происходят его раннедиагенетические преобразования, в формировании просадочности лёссовых пород — аналоговых эоловых отложений;
- 4) своеобразная логика теории, реализованная с учетом данных моделирования в виде определенного множества логико-графических моделей, по существу учитывающих правила логического вывода и доказательства причины и следствия;
- 5) совокупность введенных в данную теорию утверждений, составляющих “основной массив теоретического знания”.

Первые четыре из этих компонент описаны в главах 2—5. Поэтому далее рассмотрим лишь последнюю позицию, причем сделаем это с целью конкретизации в виде перечисления.

Основные утверждения теории формирования просадочности эоловых лёссовых пород формулируются нами в следующем виде:

- а) просадочность эоловых лёссовых пород является свойством сингенетическим, формирующимся непосредственно в ходе накопления и раннего субаэрального диагенеза в условиях переменного увлажнения изначально воздушно-сухого пылеватого осадка;
- б) просадочность эоловых лёссовых пород обусловлена реализацией в ходе литификации пылеватого осадка — молодой породы в условиях аридного климата дегидратационно-недоуплотнительного механизма<sup>1</sup>, который реализуется

---

<sup>1</sup> Точнее его было бы назвать в отношении эоловых отложений гидратационно-дегидратационно-недоуплотнительным.



вследствие несовпадения во времени оптимальных условий для уплотнения (периоды повышенного увлажнения осадка — молодой породы) и действия прогрессивно возрастающих нагрузок от продолжающих накапливаться вышележащих эоловых образований;

- в) просадочность эоловых лёссовых пород как следствие реализации этого механизма проявляется при действии как природных (это главное!), так и дополнительных нагрузок;
- г) просадочность эоловых лёссовых пород (при прочих равных условиях) является наибольшей по величине в породах элементарного слоя, увлажнение которого, пусть даже многократное, было не полным, а последующая дегидратация происходила с большой скоростью;
- д) просадочность эоловых лёссовых пород элементарного слоя формируется с очень высокой скоростью — и геологически и исторически мгновенно; она может сохраняться при определенных геологических условиях в течение достаточно длительного времени (десятки и первые сотни тысяч лет);
- е) просадочность эоловых лёссовых пород консервируется при прогрессивной аккумуляции эоловых отложений в условиях аридного климата; в итоге формируется толща сингенетически просадочных эоловых лёссовых пород;
- ж) просадочные толщи эоловых лёссовых пород теоретически должны иметь максимальные мощности по сравнению с другими генетическими типами отложений.

**Основные положения теории формирования просадочности лёссовых пород делювиального и пролювиального генезиса.** В качестве основных составляющих структуры этой частной теории выступают следующие компоненты:

- 1) многочисленные экспериментальные данные о просадочности делювиальных и пролювиальных лёссовых пород;
- 2) гипотеза Н.Я. Денисова о формировании просадочности делювиальных и пролювиальных лёссовых пород как исходная теоретическая основа;
- 3) экспериментальные данные, полученные разными авторами в лабораторных условиях и в природном массиве, доказавшие работоспособность названной гипотезы;
- 4) логико-графические модели, отражающие правила логического вывода и доказательств;
- 5) совокупность основных утверждений данной теории.

К числу таких утверждений отнесем следующие:

- а) просадочность делювиальных и пролювиальных лёссовых пород является свойством сингенетическим, формирующимся непосредственно в ходе накопления и раннего субаэрального диагенеза в условиях аридного климата изначально полностью водонасыщенного пылеватого осадка;
- б) просадочность делювиальных и пролювиальных лёссовых пород обусловлена реализацией в ходе литификации пылеватого изначально водонасыщенного осадка в условиях аридного климата дегидратационно-недоуплотнительного механизма;
- в) просадочность делювиальных и пролювиальных лёссовых пород как следствие реализации этого механизма проявляется как при природной (!), так и при дополнительной нагрузках;
- г) величина формирующейся просадочности делювиальных и пролювиальных лёссовых пород связана со скоростью дегидратации отложившихся пылеватых водонасыщенных осадков и возрастает при ее росте;
- д) просадочность делювиальных и пролювиальных лёссовых пород элементарного слоя формируется с высокой скоростью — и геологически и исторически мгновенно; однако время ее формирования у лёссовых пород данного генезиса в целом существенно больше по сравнению с эоловыми, поскольку за один цикл осадконакопления формируется существенно больший по мощности слой делювиальных и тем более пролювиальных пылеватых водонасыщенных осадков;
- е) просадочность делювиальных и пролювиальных лёссовых пород консервируется при прогрессивном накоплении отложений этого генезиса в условиях аридного климата; в итоге формируется толща сингенетических просадочных делювиальных или пролювиальных лёссовых пород.

**Основные положения теории формирования просадочности лёссовых пород аллювиального генезиса.** В структуре этой теории выделим следующие компоненты:

- 1) многочисленные экспериментальные данные о просадочности аллювиальных лёссовых пород в разрезе надпойменных террас;
- 2) исходную теоретическую основу, представленную гипотезой Н.Я. Денисова о механизме формирования просадочности аллювиальных пылеватых пород после их перехода из разреза поймы в положение первой надпойменной террасы;

- 3) многочисленные экспериментальные данные, полученные разными авторами на реальных аллювиальных породах, отобранных в разрезе поймы разных речных долин, доказавшие работоспособность названных гипотетических построений;
- 4) логико-графические модели, отражающие правила логического вывода и учитывающие различные факторы, влияющие на величину формирующейся просадочности аллювиальных лёссовых пород;
- 5) совокупность введенных основных утверждений рассматриваемой теории.

К числу таких утверждений теории формирования просадочности аллювиальных лёссовых пород отнесем такие:

- а) просадочность аллювиальных лёссовых пород является свойством эпигенетическим, формирующимся после прекращения осадконакопления, завершения процессов литификации аллювиальных пород в разрезе поймы и перехода массива пород в условия надпойменной террасы;
- б) просадочность аллювиальных лёссовых пород обусловлена реализацией в ходе последующего субаэрального литогенеза в условиях аридного или умеренного климата дегидратационно-доуплотнительного механизма<sup>1</sup>, в ходе реализации которого маловлажная (вследствие предшествующей дегидратации) аллювиальная лёссовая порода вследствие замедленного доуплотнения под дополнительной нагрузкой переходит в недоуплотненное состояние;
- в) просадочность аллювиальных лёссовых пород как следствие действия этого механизма должна проявляться только при действии дополнительных нагрузок;
- г) просадочность аллювиальных лёссовых пород элементарного слоя и толщи формируется с большой скоростью; время ее образования связано только с периодом возникновения дополнительной нагрузки, превышающей определенную критическую величину, на ранее дегидратированную пылеватую аллювиальную породу, но не коррелирует непосредственно со временем самой дегидратации пород;
- д) просадочность аллювиальных лёссовых пород консервируется в толще, верхняя граница которой находится в ста-

---

<sup>1</sup> Точнее этот механизм в отношении аллювиальных пород следовало бы назвать "последегидратационно-доуплотнительным".

бильном состоянии, при одновременном действии дополнительной нагрузки и сохранении низких значений влажности пород; ликвидация дополнительной нагрузки трансформирует просадочные аллювиальные породы в непросадочные;

- е) просадочность аллювиальных лёссовых пород по своей величине теоретически должна быть меньшей по величине по сравнению с эоловыми, делювиальными и пролювиальными;
- ж) максимальная мощность просадочных толщ аллювиальных лёссовых пород меньше этого показателя для аналогичных (просадочных) толщ эоловых, делювиальных и пролювиальных лёссовых пород.

**Основные положения теории формирования лёссовых пород разного генезиса<sup>1</sup> при реализации гипергенно-дегидратационно-разуплотнительного механизма.** В качестве основных составляющих структуры этой частной теории формирования просадочности лёссовых пород выступают следующие компоненты:

- 1) многочисленные экспериментальные данные о просадочности лёссовых пород разного генезиса и разного возраста, слагающих верхнюю часть разрезов различных геоморфологических элементов;
- 2) теоретическое описание гипергенно-разуплотнительного механизма, приведенное рядом авторов;
- 3) многочисленные экспериментальные лабораторные и полученные в условиях реальных природных массивов данные, доказавшие работоспособность теоретически постулированного гипергенно-дегидратационно-разуплотнительного механизма формирования просадочности;
- 4) логико-графические модели формирования просадочности как результата действия этого механизма в различных климатических условиях;
- 5) совокупность далее формулируемых основных утверждений рассматриваемой частной теории.

Среди этих утверждений, редакция которых согласуется нами с ранее описанными частными теориями, отметим следующее:

- а) просадочность лёссовых ("облёссованных") пород различного возраста и генезиса, венчающих разрез различных

---

<sup>1</sup> Исключая эоловые, делювиальные, пролювиальные и аллювиальные отложения.

геоморфологических элементов, является свойством эпигенетическим, сформировавшимся после формирования современного рельефа территории в условиях стабильного положения кровли рельефообразующих пород или даже ее снижения за счет развития денудации;

- б) просадочность рассматриваемых лёссовых пород обусловлена реализацией гипергенно-дегидратационно-разуплотнительного механизма, который функционирует с теми или иными особенностями в районах с разными климатическими обстановками;
- в) просадочность рассматриваемых облессованных пород проявляется при действии и природного (!) и дополнительного давления;
- г) просадочность в массивах облессованных пород формируется с большой скоростью, в определенных орографических условиях — мгновенно даже с исторических позиций; время и условия формирования просадочности совершенно не связаны со временем и условиями осадконакопления и последующей литификации осадков в породы, которые затем подвергаются облессованию;
- д) просадочность облессованных пород консервируется в разрезе во времени, если климатические условия, при которых они сформировались, сохраняются;
- е) просадочность облессованных пород по своей величине может быть высокой, соизмеримой с величиной сингенетической просадочности эоловых лёссовых пород и даже превышающей ее;
- ж) просадочные толщи облессованных пород, несмотря на это, имеют относительно небольшие мощности, обычно не достигающие 10 м.

Заканчивая рассмотрение частных теорий формирования просадочности лёссовых пород, следует отметить, что мы не можем столь же конкретно сформулировать основные положения таких теорий, теоретической основой которых являлись бы те или иные криогенные гипотезы, содержание которых описано в гл. 2. В то же время мы обязаны четко выразить свое понимание роли криогенного фактора в образовании просадочности. Сформулируем его в виде следующих позиций:

- 1) криогенный фактор не относится к числу необходимых при формировании просадочности лёссовых пород — это свойство различные генетические типы лёссовых пород могут приобретать, как свидетельствуют многочисленные экспериментальные данные, без участия какого-либо криогенного механизма;

- 2) сезонное промерзание-протаивание как мощный фактор разуплотнения различных по составу и возрасту пород рассматривается нами как один из процессов гипергенно-дегидратационно-разуплотнительного механизма формирования эпигенетической просадочности;
- 3) многолетнее эпигенетическое промерзание ныне просадочных толщ лёссовых пород севера Евразии в плейстоцене (по крайней мере позднем) — факт достоверный, отрицать и отбрасывать его невозможно. Однако надо иметь в виду, что таким способом промерзали *маловлажные* высокопористые и скорее всего уже просадочные лёссовые породы, в которых в условиях малого исходного водонасыщения лед формировался в основном в поровом пространстве на контактах между частицами и агрегатами и эффект разуплотнения структуры если и был, то минимальным. Оттаивание таких пород происходило без их существенного доуплотнения под природной нагрузкой, и законсервированная ранее просадочность сохранилась;
- 4) многолетнее промерзание в позднем плейстоцене сильно увлажненных пылеватых пород разного генезиса, сопровождавшееся образованием семейства шлировых криогенных текстур и повторно-жильных льдов, безусловно, сопровождалось разуплотнением промерзавших пород, особенно в верхней части их разреза. Однако их последующее оттаивание, как свидетельствует картина современного протаивания пылеватых пород таких массивов на севере Евразии, приводит к формированию совершенно непросадочных водонасыщенных пород. Исходя из этого необходимо сделать вывод, что современная просадочность лёссовых пород в массивах, претерпевших в своем развитии указанные особенности промерзания-оттаивания, не является продуктом действия криогенного фактора. Она имеет голоценовый возраст и обусловлена, с нашей точки зрения, реализацией гипергенно-дегидратационно-разуплотнительного механизма;
- 5) оценить роль газогидратного механизма дегидратации толщ мерзлых пород и сохранения их высокой пористости и как следствие этого приобретения просадочности, выдвинутого А.А. Коноваловым в 1997 г., в настоящее время мы не можем, прежде всего из-за недостаточного обоснования условий реализации этого механизма и отсутствия какого-либо специально ориентированного экспериментального материала. Подчеркнем лишь, что наши наблюдения за дегазацией газогидратосодержащих брекчий, поднятых из

грязевых вулканов дна Черного моря, свидетельствуют о сохранении высокой исходной пористости у дегазированных образцов.

### 6.3.

#### Основные положения общей теории формирования просадочности лёссовых пород

Вопрос о формулировке основных положений общей теории формирования просадочности лёссовых пород возник вследствие того, что, исходя из частных теорий формирования этого свойства у лёссовых пород определенного генетического типа, не могут быть объяснены все особенности проявления и изменения просадочности по разрезу лёссовых толщ. Об этом уже говорилось в гл. 2. Здесь приведем лишь две позиции.

Первая из них напоминает широко известный факт: во многих разрезах надпойменных террас, сложенных классическим аллювием, лёссовые породы, венчающие разрез, проявляют просадочные свойства не только при дополнительных, но и при действии природной нагрузки. Это не согласуется с основными положениями частной теории формирования просадочности лёссовых пород аллювиального генезиса.

Второй пример. В разрезах многих мощных циклично построенных толщ лёссовых пород эолового и пролювиального генезиса величина просадочности ниже горизонтов современной или погребенных почв резко возрастает по величине и часто становится максимальной для разреза данного циклита. Такая картина распределения значений просадочности не может быть объяснена положениями частных теорий формирования просадочности лёссовых пород эолового или пролювиального генезиса.

Исходной теоретической основой общей теории формирования просадочности лёссовых пород, которая позволила бы описать и объяснить процесс формирования просадочности лёссовых пород как их полигенной совокупности с различным распределением ее (просадочности) по разрезу, является *постулат о возможности одновременного, частично одновременного или последовательного действия различных механизмов, приводящих к образованию рассматриваемого свойства*. Эта идея не нова по содержанию, но в явном виде ее никто не формулировал

Если принять в качестве исходной позиции этот постулат, то следует принять и следующую позицию: величина и распределение просадочности по разрезу есть функции наложения друг на друга различных процессов ее формирования. При этом следует подчеркнуть, что среди действующих механизмов фор-

мирования просадочности есть по крайней мере один, который является всеобщим механизмом, проявляющимся и накладывающимся на любой другой действующий или на результаты действовавшего ранее механизма. Таким механизмом, с нашей точки зрения, является гипергенно-дегидратационно-разуплотнительный механизм формирования просадочности, который теоретически может проявляться везде и всегда и который в том или ином виде сопровождает любой другой процесс формирования и развития пород в субаэральных условиях.

Исходя из этого отнесем к важнейшим элементам структуры общей теории формирования просадочности лёссовых пород следующие компоненты:

- 1) многочисленные эмпирические данные о просадочности лёссовых пород разного возраста и генезиса, часть из которых не может быть объяснена на основе частных теорий формирования просадочности лёссовых пород определенного генезиса;
- 2) теоретический постулат — формирование просадочности лёссовых пород может быть обусловлено как действием отдельных (частных) механизмов, так и их “наложением” друг на друга<sup>1</sup>;
- 3) многочисленные экспериментальные лабораторные и применительно к массиву доказательства работы разных механизмов формирования просадочности лёссовых пород;
- 4) логико-графические модели формирования просадочности лёссовых пород, отражающие важные закономерности формирования просадочности лёссовых пород, в том числе и модели, учитывающие наложение одних механизмов на результаты действия предшествовавших;
- 5) совокупность далее вводимых утверждений, вытекающих из принятых теоретических предпосылок и экспериментальных доказательств.

Основные утверждения общей теории формирования просадочности лёссовых пород формируются нами в следующих содержаниях и редакции:

- а) просадочность лёссовых пород в реальных разрезах, в том числе и в одном разрезе, может иметь разный генезис —

---

<sup>1</sup> Такое истинное наложение может происходить при одновременном развитии или хотя бы частичном совпадении времени развития двух механизмов. Однако мы называем этим же словом результат наложения действия одного механизма на результат другого, причем время проявления второго механизма не связано со временем реализации первого.



сингенетический, эпи-сингенетический, син-эпигенетический и эпигенетический;

- б) просадочность как сингенетическое свойство может сформироваться только в лёссовых породах эолового, делювиального и пролювиального генезиса в соответствии с описанным ранее дегидратационно-недоуплотнительным механизмом;
- в) просадочность как эпи-сингенетическое и син-эпигенетическое свойство формируется при наложении гипергенно-дегидратационно-разуплотнительного механизма (точнее, гипергенно-разуплотнительной его составляющей) на законсервированные результаты дегидратационно-недоуплотнительного механизма в просадочных толщах эоловых, делювиальных и пролювиальных лёссовых пород. В случае формирования просадочности как эпи-сингенетического свойства ведущая роль остается, можно сказать, за первичным — дегидратационно-недоуплотнительным механизмом, во втором случае — син-эпигенетическая просадочность — ведущая роль в формировании просадочности уже принадлежит наложенному механизму;
- г) просадочность как эпигенетическое свойство лёссовых пород формируется только под влиянием дегидратационно-доуплотнительного механизма в аллювиальных отложениях и гипергенно-дегидратационно-разуплотнительного механизма, всеобщего по своей сущности;
- д) просадочность в нижней части разреза большинства циклитов мощных циклично построенных толщ лёссовых пород эолового и пролювиального генезиса является сингенетической, выше по разрезу — эпи-сингенетической, а в верхней части циклита под горизонтами современной и погребенных почв — син-эпигенетической вследствие наложения результатов действия гипергенно-разуплотнительного механизма;
- е) просадочность лёссовых пород любого генезиса вследствие наложения гипергенно-разуплотнительного механизма может проявляться под действием не только дополнительной, но и природной нагрузки;
- ж) максимальная величина просадочности лёссовых пород должна быть свойственна тем частям разреза, в пределах которых по генезису она эпи-сингенетическая или син-эпигенетическая;
- з) максимальные мощности просадочных лёссовых пород наблюдаются в разрезах эоловых и пролювиальных отложений, просадочность которых является свойством синге-

нетическим. Наложение гипергенно-разуплотнительного механизма на породы таких разрезов не приводит к увеличению мощности просадочной толщи ни в целом, ни в разрезах отдельных циклитов.

Позиции, сформулированные в общей теории формирования просадочности лёссовых пород, позволяют, с нашей точки зрения и исходя из нашего опыта, объяснить ход процесса формирования просадочности в разрезах лёссовых пород любого строения. Это не означает, что при этом не возникает каких-либо вопросов и просто трудностей. Но они появляются главным образом из-за невысокого уровня знаний формирования и дальнейшей "жизни" массивов лёссовых пород. Необходимо дальнейший поиск новых подходов к получению более достоверных данных по этим вопросам, в частности комплексирования абсолютного датирования, изотопии, детального изучения спорово-пыльцевых комплексов, которые сейчас используются инженерами-геологами лишь эпизодически. Все эти методы должны тесно комплексироваться с детальным инженерно-геологическим опробованием опорных разрезов лёссовых пород.

*Абелев Ю.М., Абелев М.Ю.* Основы проектирования и строительства на просадочных макропористых грунтах. М., 1968. 432 с.

*Акгаев Г.А., Нургельдыев Н., Амаков С.* О прогнозе просадки лёссовых пород зоны Каракумского канала им. В.И. Ленина // Генезис, просадочность лёссовых пород и методы их изучения. Ташкент, 1985. С. 189—196.

*Ананьев В.П., Коробкин В.И.* Минералы лёссовых пород. Ростов-на-Дону, 1980. 200 с.

*Андреева Т.В.* Новые аспекты в теории формирования недоуплотненности лёссовых грунтов // Новые идеи в инженерной геологии. М., 1996. С. 52.

*Андреева Т.В.* Результаты моделирования сингенетической просадочности золовых лёссовых пород // Геоэкология. 1996а. № 1. С. 79—84.

*Андреева Т.В.* Исследование формирования сингенетической просадочности золовых лёссовых пород // Новые идеи в науках о Земле // Тр. междунар. конференции. М., 1997. С. 90.

*Балаев Л.Г., Коробкин В.И., Галай Б.Ф.* Субаэральный литогенез и свойства пылевато-глинистых отложений. Ростов-на-Дону, 1985. 208 с.

Большая Советская Энциклопедия. Т. 6. 3-е изд. М., 1971. 604 с.

Большая Советская Энциклопедия. Т. 16. 3-е изд. М., 1974. 616 с.

Большая Советская Энциклопедия. Т. 25. 3-е изд. М., 1976. 600 с.

*Бондаренко В.С.* Инженерно-геологические особенности облессованных разностей отложений олигоценевого возраста Белогорского материка // Повышение эффективности инженерных изысканий для строительства в нефтегазоносных районах Западной Сибири // Тез. Всес. научно-практической конференции 22—24 ноября 1983 г. Тюмень, 1983. С. 60—61.

*Воляник Н.В.* Классификация лёссовых грунтов // Инженерная геология лёссовых пород / Тез. докл. всес. совещ. Ростов-на-Дону, 1989. Кн. 1. М., 1989. С. 4—6.

*Воронин А.М.* Роль сезонного промерзания в возникновении просадочности у лёссовых пород: Автореф. дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 1973. 24 с.

*Воронин А.М., Минервин А.В.* Формирование просадочных свойств лёссовых пород юга Западной Сибири в результате промерзания-оттаивания и высушивания // Вестн. Моск. ун-та. Серия 4, Геология. 1973. № 2. С. 87—95.

*Галай Б.Ф.* О гранулометрической классификации лёссовых пород (на примере Северного Кавказа) // Классификационные критерии разделения лёссовых пород. М., 1984. С. 23—25.

Галай Б.Ф. Моделирование формирования сингенетической просадочности эоловых лёссовых пород // Субэаральный литогенез и свойства пылевато-глинистых отложений. Ростов-на-Дону, 1985. С. 73—79.

Галай Б.Ф. Методика и результаты моделирования просадочности эоловых лёссовых грунтов // Свойства грунтов и инженерно-геологические процессы. М., 1987. С. 102—109.

Галай Б.Ф. Литогенез и просадочность эоловых лёссов (на примере Центрального Предкавказья): Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. М., 1992. 39 с.

Геологический словарь. Т. 2. М., 1978. 436 с.

Грунтоведение. М., 1971. 596 с.

Грунтоведение. М., 1983. 392 с.

Грунты. Классификация. ГОСТ 25100—82. М., 1982. 11 с.

Денисов Н.Я. О генезисе просадочных лёссовидных суглинков // Докл. АН СССР. 1940. Т. 28. № 6. С. 526—527.

Денисов Н.Я. О природе просадочных явлений в лёссовых суглинках. М., 1946. 176 с.

Денисов Н.Я. О природе деформации глинистых пород. М., 1951. 200 с.

Денисов Н.Я. Строительные свойства лёсса и лёссовидных суглинков. М., 1953. 154 с.

Денисов Н.Я. Строительные свойства глинистых пород и их использование в гидротехническом строительстве. М., 1956. 288 с.

Ершова А.В. Влияние нагрузки на формирование эпигенетической просадочности аллювиальных грунтов при дегидратации // Геоэкология. 1995. № 4. С. 90—93.

Ершова А.В. О возможности формирования эпигенетической просадочности у аллювиальных пылеватых пород при дегидратации под нагрузкой // Тез. Межд. конференции студентов и аспирантов по фундам. наукам “Ломоносов-96”. М., 1995а. С. 43—45.

Ершова А.В. Экспериментальное доказательство и логико-графическая модель формирования просадочности аллювиальных пылеватых пород при дегидратации: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 1997. 24 с.

Жумагулов Ж. Проллювиальные лёссовые породы Гиссаро-Сурхандарьинской впадины и их просадочные свойства // Проблемы лёссовых пород в сейсмических районах / Тр. Всес. совещ. 1980 г. Ташкент, 1982. С. 162—168.

Зиангиров Р.С., Быкова В.С. О совершенствовании классификации лёссовых грунтов. ГОСТ 25100—82 // Классификационные критерии разделения лёссовых пород. М., 1984. С. 14—19.

Инженерная геология лёссовых пород // Тез. докл. Всес. совещ. Ростов-на-Дону, 1989. Кн. 1. М., 1989. 127 с.

Кадыров Э.В. Лёссовые породы: происхождение и строительные свойства. Ташкент, 1979. 167 с.

Кадыров Э.В. Закономерности распространения лёссов на поверхности Земли // Проблемы гидрогеологии и инженерной геологии. Ташкент, 1990. С. 49—52.

Карта прогноза просадочности территории распространения лёссовых пород в СССР. Масштаб 1:2 500 000. М., 1989.

Классификационные критерии разделения лёссовых пород. М., 1984. 86 с.

Коламийцев Н.В. Условия формирования ательских лёссовых пород Прикаспийской впадины и их инженерно-геологическая характеристика: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 1985. 18 с.

Коламийцев Н.В. Условия формирования просадочности ательских лёссовых пород Нижнего Поволжья // Инженерная геология. 1985а. № 2. С. 26—34.

Комиссаров Н.Н., Коламийцев Н.В. Формирование просадочности лёссовых пород водного и субэарального генезиса // Инженерно-геологические особенности цикличности лёссов. М., 1987. С. 64—68.

Комиссарова Н.Н., Коломийцев Н.В. Моделирование просадочности пылеватых образований эолового генезиса // Вестн. Моск. ун-та. Серия 4, Геология. 1987а. № 4. С. 32—38.

Комиссарова Н.Н., Коломийцев Н.В., Жихарева А.Е. Роль циклического увлажнения-высушивания в разуплотнении искусственно уплотненных лёссовых грунтов // Инженерная геология. 1988. № 3. С. 27—34.

Коновалов А.А. О природе просадочности лёссовых грунтов // Геоэкология. 1997. № 1. С. 90—95.

Копнин П.В. Логические основы науки. Киев, 1968. 188 с.

Коробкин В.И. О стадийности формирования просадочности лёссовых пород // Инженерная геология лёссовых пород / Тез. докл. Всес. совещ. Ростов-на-Дону, 1989. Кн. 1. М., 1989. С. 10—12.

Королев В.А., Еремينا О.Н. К вопросу о формировании аутогезионного сцепления в лёссовых породах в связи с их просадочностью // Инженерная геология. 1986. № 2. С. 50—57.

Краев В.Ф., Шестак И.К. Роль литогенеза при разделении лёссовых пород Украины // Классификационные критерии разделения лёссовых пород. М., 1984. С. 32—35.

Кригер Н.И. Лёсс, его свойства и связь с географической средой. М., 1965. 296 с.

Кригер Н.И. Принцип Денисова и его значение для понимания проблемы лёсса // Тез. докл. Молд. республ. совещ. по инженерной геологии. Кишинев, 1969. С. 194—197.

Кригер Н.И. Условия образования просадочных свойств лёсса и других пород на Земле // Тр. Межд. симпоз. по литол. и генезису лёссовых пород. Т. 1. Ташкент, 1970. С. 46—53.

Кригер Н.И. Что такое лёсс (вопросы определения и классификации) // Классификационные критерии разделения лёссовых пород. М., 1984. С. 6—14.

Кригер Н.И. Лёсс. Формирование просадочных свойств. М., 1986. 133 с.

Кригер Н.И. Происхождение просадочных свойств лёсса и лёссовидных пород // Инженерная геология лёссовых пород / Тез. докл. Всес. совещ. Ростов-на-Дону, 1989. Кн. 1. М., 1989. С. 9—10.

Кригер Н.И., Котельникова Н.Е., Лаврусевич С.И. и др. Закономерности формирования просадочных свойств лёссовых пород Средней Азии и Южного Казахстана. М., 1981. 132 с.

Крутов В.И. Основания и фундаменты на просадочных грунтах. Киев, 1982. 224 с.

Крутов В.И. Учет новых результатов по просадочности грунтов при изысканиях, проектировании и строительстве // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1995. № 1. С. 15—19.

Крутов В.И. Классификация просадочных лёссовых грунтов // Геоэкология. 1998. № 3. С. 55—64.

Крутов В.И., Багдасаров Ю.А. Проектирование и строительство на лёссовых просадочных грунтах // Современные проблемы инженерной геологии лёссовых пород. М., 1989. С. 54—69.

Ларионов А.К. Условия выбора классификационных критериев лёссовых пород // Классификационные критерии разделения лёссовых пород. М., 1984. С. 3—6.

Ларионов А.К., Приклонский В.А., Ананьев В.П. Лёссовые породы СССР и их строительные свойства. М., 1959. 368 с.

Лёссовые породы СССР. М., 1966. 256 с.

Лёссовые породы СССР / Под ред. Е.М. Сергеева, А.К. Ларионова, Н.Н. Комиссаровой. М., 1986. Т. 1. 232 с.; Т. 2. 276 с.

- Лысенко М.П.* Лёссовые породы. Л., 1978. 208 с.
- Мавлянов Г.А.* Генетические типы лёссов и лёссовидных пород Центральной и Южной частей Средней Азии и их инженерно-геологические свойства. Ташкент, 1958. 610 с.
- Мавлянов Г.А.* и др. Инженерно-геологические условия Каршинской степи. Ташкент, 1974. 279 с.
- Мавлянов Н.Г.* О формировании просадочности лёссовых пород Средней Азии // Инженерная геология лёссовых пород / Тез. Всес. совещ. Т. 1. Ростов-на-Дону, 1989. С. 20—21.
- Минервин А.В.* Генезис и инженерно-геологическая характеристика покровных отложений долины р. Оби (в ее среднем и нижнем течении): Автореф. канд. дис. М., 1959. 22 с.
- Минервин А.В.* Лёссовые породы долины р. Оби (в ее среднем и нижнем течении) // Физико-механ. свойства и вопр. формир. лёссовых пород Сибири. М., 1968. С. 135—143.
- Минервин А.В.* Роль процессов гипергенеза в формировании просадочности лёссовых пород юга Сибири // Генетические основы инженерно-геологического изучения горных пород. М., 1975. С. 305—314.
- Минервин А.В.* Формирование просадочных свойств лёссов из эоловой пыли в современных условиях Средней Азии // Геоэкология. 1979. № 3. С. 78—85.
- Минервин А.В.* Природа просадочности и генезис лёссовых пород // Проблемы лёссовых пород в сейсмических районах / Тр. Всес. совещ. Самарканд, 1980; Ташкент, 1982. С. 10—32.
- Минервин А.В.* Роль криогенных процессов в формировании лёссовых пород // Проблемы криолитологии. Вып. 10. М., 1982. С. 41—60.
- Минервин А.В.* Инженерно-геологическая классификация лёссовых пород по просадочности // Классификационные критерии разделения лёссовых пород. М., 1984. С. 21—23.
- Минервин А.В.* Новые данные по моделированию формирования просадочности лёссовых пород в природных условиях // Геоэкология. 1992. № 5. С. 44—53.
- Минервин А.В., Комиссарова Н.Н.* Природа просадочности лёссовых пород // Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. Вып. 5. М., 1983. С. 16—31.
- Минервин А.В., Сергеев Е.М.* Сущность процесса облессования в подзолистой зоне // Вестн. Моск. ун-та. Серия 4, Геология. 1961. № 5. С. 3—14.
- Минервин А.В., Сергеев Е.М.* Новые данные к решению проблемы лёсса // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1964. № 5. С. 53—64.
- Минервин Е.М., Сергеев Е.М.* Сезонные изменения плотности лёссовых пород // Вестн. Моск. ун-та. Серия 4, Геология. 1971. № 5. С. 78—85.
- Морозов С.С.* Классификация лёссовых пород // Тр. совещ. по инженерно-геологическим свойствам горных пород и методам их изучения. Т. 1. М., 1956. С. 185—189.
- Морозов С.С.* Материалы по региональному грунтоведению. М., 1964. 154 с.
- Нажсем Абдул Мукир.* Изменение физико-механических свойств лёссовых грунтов в процессе орошения (на примере дельты р. Акчадары): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 1986. 19 с.
- Осипов В.И.* Формирование просадочности лёссов при их циклическом увлажнении и высушивании // Теория цикличности лёссов в практике инженерно-геологических изысканий. М., 1985. С. 152—158.
- Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А.* Микроструктура глинистых пород. М., 1989. 212 с.
- Полянин Б.А., Колобов К.Н.* О литологической классификации лёссовых пород Татари // Классификационные критерии разделения лёссовых пород. М., 1984. С. 41—43.
- Попов А.И., Розенбаум Г.Э., Тумель Н.В.* Криолитология. М., 1985. 239 с.

Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01—83). М., 1986. 416 с.

Пояснительная записка к Карте прогноза просадочности территории распространения лёссовых пород в СССР, масштаб 1:2 500 000. М., 1989. 20 с.

*Пустовалов Л.В.* Петрография осадочных пород. Ч. 1. М.; Л., 1941.

*Рахматуллаев Х.Л.* Исследование просадочности основных генетических и возрастных типов лёссовых пород Чирчик-Ахангаранской впадины (УзССР): Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 1977. 25 с.

*Рахматуллаев Х.Л.* Просадочность основных генетических и возрастных типов лёссовых пород Чирчик-Ахангаранской впадины. Ташкент, 1982. 159 с.

*Рухин Л.Б.* Основы литологии. Л., 1969. 704 с.

*Сергеев Е.М.* Генезис лёссов в связи с их инженерно-геологическими особенностями // Вестн. Моск. ун-та. Серия 4, Геология. 1976. № 5. С. 3—15.

*Сергеев Е.М., Ларионов А.К., Быкова В.С.* Просадочность как специфическое свойство лёссовых пород // Современные проблемы инженерной геологии лёссовых пород. М., 1989. С. 5—19.

*Скалецкий Е.Н.* Изменение просадочности лёссов с глубиной // Инженерная геология. 1987. № 1. С. 50—62.

*Скалецкий Е.Н.* Закономерности изменения просадочности с глубиной // Инженерно-геологические особенности цикличности лёссов. М., 1987а. С. 58—67.

СНиП П-Б. 1—62. Основания зданий и сооружений. Нормы проектирования. М., 1962. 52 с.

СНиП П—15—74. Основания зданий и сооружений. М., 1975. 46 с.

СНиП 2.02.01—83. Основания зданий и сооружений. М., 1985. 42 с.

Современные проблемы инженерной геологии лёссовых пород. М., 1989. 120 с.

*Трофимов В.Т.* Инженерно-геологическая характеристика лёссовых пород окрестностей г. Ханты-Мансийска // Изв. высш. учеб. заведений. Сер. геологии и разведки. 1963. № 8. С. 101—106.

*Трофимов В.Т.* О гипотезах формирования просадочности лёссовых пород // Проблемы лёссовых пород в сейсмических районах. Ташкент, 1980. С. 100—103.

*Трофимов В.Т.* Закономерности распределения просадочности в циклически построенных толщах лёссовых пород: морфологический и генетические аспекты // Теория цикличности лёссов в практике инженерно-геологических изысканий. М., 1985. С. 10—20.

*Трофимов В.Т.* Генезис просадочности лёссовых пород (гипотезы, экспериментальные данные, задачи дальнейших исследований). Статья 1 // Вестн. Моск. ун-та. Серия 4, Геология. 1986а. № 1. С. 78—91.

*Трофимов В.Т.* Генезис просадочности лёссовых пород (гипотезы, экспериментальные данные, задачи дальнейших исследований). Статья 2 // Вестн. Моск. ун-та. Серия 4, Геология. 1986б. № 2. С. 60—76.

*Трофимов В.Т.* Современное состояние проблемы и задачи дальнейшего изучения генезиса просадочности лёссовых грунтов // Инженерно-геологические особенности цикличности лёссов. М., 1987а. С. 46—54.

*Трофимов В.Т.* Гипотезы просадочности лёссовых пород и их экспериментальное подтверждение // Цикличность новейших субаэриальных отложений. Новосибирск, 1987б. С. 40—48.

*Трофимов В.Т.* Классификация гипотез о генезисе просадочности лёссовых пород // Инженерная геология лёссовых пород / Тез. докл. Всес. совещ. Ростов-на-Дону. 1989. Кн. 1. М., 1989. С. 7—9.

*Трофимов В.Т.* Итоги и задачи экспериментальных работ по моделированию формирования просадочности лёссовых пород // Там же. 1989а. С. 15—17.

*Трофимов В.Т.* Генезис лёссовых пород и генезис просадочности лёссовых пород // Проблемы инженерно-геологических и гидрогеологических исследований / Тр. ГИДРОИНГЕО. Ташкент, 1990. С. 3—8.

Трофимов В.Т. Модели формирования просадочности пролювиальных лёссовых пород // Там же. 1990а. С. 58—64.

Трофимов В.Т. Модели формирования просадочности лёссовых пород // Вестн. Моск. ун-та. Серия 4, Геология. 1990б. № 2. С. 3—19.

Трофимов В.Т. Некоторые экспериментальные доказательства формирования сингенетической просадочности эоловых лёссовых пород // Инженерная геология. 1990в. № 6. С. 11—24.

Трофимов В.Т. Об инженерно-геологическом содержании термина "лесс" и его производных // Инженерная геология. 1992. № 6. С. 14—24.

Трофимов В.Т. О сингенетической и эпигенетической просадочности лёссовых грунтов // Геоэкология. 1997. № 2. С. 69—77.

Трофимов В.Т. Логико-графические модели формирования свойств грунтов: ретроспектива, современное состояние и задачи дальнейших работ // Генезис и модели формирования свойств грунтов / Тр. Междунар. научн. конф. Россия. М., 1998. С. 19—22.

Трофимов В.Т. Генезис просадочности лёссовых грунтов и логико-графические модели ее формирования применительно к объему элементарного слоя и толщи // Там же. 1998а. С. 44—54.

Трофимов В.Т., Алексеенко Т.Г., Васильева Л.О., Куликова Е.Ю. Влияние температуры на поверхности толщи на формирование просадочности лёссовых пород // Инженерная геология. 1991. № 3. С. 20—24.

Трофимов В.Т., Бондаренко В.С. О результатах моделирования формирования просадочности грунтов в процессе прогрессивного литогенеза // Инженерная геология. 1983. № 6. С. 32—38.

Трофимов В.Т., Бондаренко В.С. Об особенностях современного облессования высокодисперсных пылеватых пород в гумидных условиях (на примере района г. Тобольска, Зап. Сибирь) // Природные условия Западной Сибири. Вып. 9. М., 1983а. С. 32—44.

Трофимов В.Т., Бондаренко В.С. Особенности современного облессования пород различного гранулометрического состава в гумидных условиях // Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. Вып. 5. М., 1983б. С. 32—43.

Трофимов В.Т., Бондаренко В.С. Современные гипергенные процессы как фактор формирования просадочности лёссовых пород в центральных районах Западной Сибири // Теория цикличности лёссов в практике инженерно-геологических изысканий. М., 1985. С. 121—130.

Трофимов В.Т., Бондаренко В.С. Закономерности развития процессов облессования горных пород в центральных районах региона // Прогноз изменения природных условий Западной Сибири / Под ред. А.И. Попова, В.Т. Трофимова. М., 1988. С. 36—43.

Трофимов В.Т., Бондаренко В.С., Горский М.Р., Яковлев М.И. Новые экспериментальные данные к решению проблемы генезиса просадочности аллювиальных лёссовых грунтов // Инженерно-геологические особенности цикличности лёссов. М., 1987. С. 68—73.

Трофимов В.Т., Бондаренко В.С., Назмиева К.Я. О формировании просадочных свойств лёссовых пород в современных условиях в центральных районах Западно-Сибирской плиты // Проблемы лёссовых пород в сейсмических районах / Тез. докл. Всес. совещ. Ташкент, 1980. С. 105—108.

Трофимов В.Т., Бондаренко В.С., Румянцева Н.А. Новые данные к познанию механизма формирования сингенетической просадочности лёссовых пород водного генезиса // Инженерная геология. 1987. № 6. С. 46—52.

Трофимов В.Т., Бондаренко В.С., Яковлев М.И., Горский М.Р. Результаты моделирования формирования просадочности у аллювиальных пылеватых пород // Инженерная геология. 1986а. С. 21—29.



*Трофимов В.Т., Бондаренко В.С., Яковлев М.И., Горский М.Р.* Новые данные к решению проблемы генезиса просадочности аллювиальных лёссовых пород // Докл. АН СССР. 1986а. Т. 290. № 3. С. 696—699.

*Трофимов В.Т., Величко А.А., Шаевич Я.Е.* Опорные инженерно-геологические разрезы просадочных лёссовых пород СССР // Современные проблемы инженерной геологии лёссовых пород. М., 1989. С. 86—99.

*Трофимов В.Т., Горский М.Р.* Новые экспериментальные данные к познанию механизма формирования эпигенетической просадочности у пылеватых аллювиальных пород // Инженерная геология. 1988. № 5. С. 22—32.

*Трофимов В.Т., Ершова А.В.* Влияние температурных условий дегидратации толщ на формирование эпигенетической просадочности пылеватых аллювиальных пород // Вестн. Моск. ун-та. Серия 4. Геология. 1991. № 6. С. 75—84.

*Трофимов В.Т., Куликова Е.Ю.* Новые экспериментальные данные к познанию механизма формирования сингенетической просадочности пылеватых эоловых отложений // Вестн. Моск. ун-та. Серия 4. Геология. 1995. № 4. С. 37—52.

*Трофимов В.Т., Минервин А.В.* Западная часть Западно-Сибирской плиты // Лёссовые породы СССР. М., 1966. С. 105—126.

*Трофимов В.Т., Минервин А.В.* О просадочности лёссовых пород западной части Западно-Сибирской низменности // Вопросы инженерной геологии и грунтоведения. Вып. 2. М., 1968. С. 121—126.

*Трофимов В.Т., Рац М.В., Шаевич Я.Е.* Инженерно-геологические проблемы изучения циклически построенных толщ // Прикладные вопросы седиментационной цикличности и нефтегазоносности. Новосибирск, 1987. С. 147—152.

*Трофимов В.Т., Шаевич Я.Е.* Лёссовые породы Западной Сибири // Лёссовые породы СССР. Т. 2. М., 1986. С. 53—85.

Философская энциклопедия. Т. 1. М., 1960. 504 с.

Философская энциклопедия. Т. 2. М., 1962. 576 с.

Философская энциклопедия. Т. 5. М., 1970. 740 с.

Философский энциклопедический словарь. М., 1983. 840 с.

*Шаевич Я.Е.* Цикличность в формировании лёссов. М., 1987. 104 с.

*Шаевич Я.Е., Трофимов В.Т.* К вопросу о разработке классификации лёссовых толщ по особенностям строения и характеру просадочности // Инженерно-геологические особенности цикличности лёссов. М., 1987. С. 82—90.

*Шанцер Е.В.* Генетические типы четвертичных отложений // Стратиграфия СССР. Четвертичная система. I полутом. М., 1982. С. 61—94.

*Швецов М.С.* Петрография осадочных пород. М., 1958. 417 с.

Экзогеодинамика Западно-Сибирской плиты (пространственно-временные закономерности) / Под ред. В.Т. Трофимова. М., 1986. 288 с.

# Оглавление

Введение . . . . .	3
--------------------	---

## Глава 1

### ПРОСАДОЧНОСТЬ — СПЕЦИФИЧЕСКОЕ СВОЙСТВО ЛЁССОВЫХ ПОРОД

1.1. Просадочность лёссовых пород и просадка их толщ . . . . .	9
1.2. Показатели просадочности лёссовых пород . . . . .	13
1.3. Типы грунтовых условий массивов лёссовых пород по просадочности . . . . .	23
1.4. Закономерности распространения лёссовых пород и их просадочность . . . . .	28
1.5. О максимальных мощностях просадочных толщ лёссовых пород . . . . .	37
1.6. Изменение величины просадочности по разрезу толщи лёссовых пород . . . . .	54
1.7. Классификация толщ лёссовых пород по их строению и особенностям изменения просадочности . . . . .	61
1.8. Об инженерно-геологическом содержании термина “лёсс” и его производных . . . . .	67

## Глава 2

### ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ ПРОСАДОЧНОСТИ ЛЁССОВЫХ ПОРОД

2.1. Общие положения вопроса о генезисе просадочности лёссовых пород . . . . .	81
2.2. Систематика выдвинутых гипотез формирования просадочности лёссовых пород . . . . .	92
2.3. Краткая характеристика содержания гипотез о генезисе просадочности лёссовых пород . . . . .	95

## Глава 3

### ПРОСАДОЧНОСТЬ КАК СИНГЕНЕТИЧЕСКОЕ СВОЙСТВО ЛЁССОВЫХ ПОРОД — ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА

3.1. Экспериментальные данные о формировании сингенетической просадочности эоловых лёссовых пород в соответствии с дегидратационно-недоуплотнительной гипотезой Н.Я. Денисова . . . . .	107
---	-----

3.2. Экспериментальные данные о формировании сингенетической про- садочности делювиальных и пролювиальных лёссовых пород в соот- ветствии с дегидратационно-недоуплотнительной гипотезой Н.Я. Де- нисова . . . . .	140
3.3. Экспериментальные данные о формировании сингенетической про- садочности лёссовых пород субаквального генезиса в соответст- вии с дегидратационно-недоуплотнительной гипотезой Н.Я. Дени- сова . . . . .	144
3.4. Экспериментальные данные о формировании сингенетической про- садочности пылеватых полидисперсных полиминеральных смесей чистых минералов в соответствии с дегидратационно-недоуплотни- тельной гипотезой Н.Я. Денисова . . . . .	150
3.5. Экспериментальные данные о формировании сингенетической про- садочности лёссовых пород в соответствии с криосингенетическо-суб- лимационной гипотезой А.В. Минервина—Н.Н. Комиссаровой . . . .	160

#### Глава 4

### ПРОСАДОЧНОСТЬ КАК ЭПИГЕНЕТИЧЕСКОЕ СВОЙСТВО ЛЁССОВЫХ ПОРОД — ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА

4.1. Экспериментальные данные о формировании эпигенетической про- садочности аллювиальных лёссовых пород в соответствии с дегид- ратационно-доуплотнительной гипотезой Н.Я. Денисова . . . . .	162
4.2. Экспериментальные данные о формировании эпигенетической про- садочности лёссовых пород различного генезиса и возраста в со- ответствии с гипергенно-дегидратационно-разуплотнительной гипот- езой . . . . .	185
4.3. Экспериментальные данные о формировании эпигенетической про- садочности лёссовых пород различного генезиса и возраста в соот- ветствии с криоэлювиальной гипотезой . . . . .	203
4.4. Экспериментальные данные о формировании эпигенетической про- садочности лёссовых пород различного генезиса и возраста в соот- ветствии с криоэпигенетическо-сублимационной гипотезой А.В. Ми- нервина . . . . .	209

#### Глава 5

### ЛОГИКО-ГРАФИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСАДОЧНОСТИ ЛЁССОВЫХ ПОРОД

5.1. О моделях формирования свойств горных пород . . . . .	213
5.2. Логико-графические модели формирования сингенетической про- садочности лёссовых пород элементарного слоя . . . . .	218
5.3. Логико-графические модели формирования эпигенетической про- садочности лёссовых пород элементарного слоя . . . . .	234
5.4. О путях построения логико-графических моделей формирования про- садочности лёссовых пород элементарного слоя с координатой вре- мени . . . . .	240
5.5. Логико-графические модели формирования просадочности толщи лёс- совых пород . . . . .	242

## Глава 6

### ОСНОВЫ ЧАСТНЫХ И ОБЩЕЙ ТЕОРИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОСАДОЧНОСТИ ЛЁССОВЫХ ПОРОД

6.1. Общие замечания о типе формулируемых теорий . . . . .	248
6.2. Основные положения частных теорий формирования просадочности лёссовых пород различных генетических типов . . . . .	250
6.3. Основные положения общей теории формирования просадочности лёссовых пород . . . . .	258
<i>Литература</i> . . . . .	262

Научное издание

*ТРОФИМОВ ВИКТОР ТИТОВИЧ*

*ГЕНЕЗИС  
ПРОСАДОЧНОСТИ  
ЛЁССОВЫХ ПОРОД*

---

Зав редакцией  
*И И Щехура*

Редактор  
*Л М Батыгина*

Художественный редактор  
*Ю М Добрянская*

Технический редактор  
*З С Кондрашова*

Корректоры  
*Н И Коновалова,  
Н В Иванова*

Компьютерная верстка  
*С Ю Воронина*

Изд лиц № 040414 от 18 04 97 г

Подписано в печать 23 03 99 г

Формат 60 × 90 1/16 Бумага офс № 1

Усл печ л 17,0 Уч-изд л 17,75

Тираж 1000 экз Заказ 3433—99

Ордена “Знак Почета”

издательство Московского университета  
103009, Москва, ул Б Никитская, 5/7

Отпечатано с оригинал-макета заказчика в 12 ЦТ МО