

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



А.В. Зуска

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ

Монография

Днепропетровск
НГУ
2014

УДК528.481
ББК 33.131
3 89

Рекомендовано до друку вченою радою Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» (протокол № 2 від 25.02.2014).

Рецензенти:

П. Й. Федоренко – д-р техн. наук, проф. (Криворізький технічний університет);

О.В. Солодянкін – д-р техн. наук, проф. (Державний ВНЗ «Національний гірничий університет»).

Зуска А.В.

3 89 Кинематическая модель оползневых склонов: монография /А.В. Зуска; М-во образования и науки Украины; Нац. горн. ун-т. – Д.: НГУ, 2014. – 140 с.

ISBN 978-966-350-480-3

Используя опыт многих ученых в изучении оползневых процессов и методов борьбы с ними, обобщено виды оползней на естественных склонах балок, сложенных лёссовыми породами, приведены результаты исследований динамики смещений и закономерности развития оползней на склонах балок Днепропетровска. Исследовано влияние геометрических параметров инженерно-геологических элементов строения склонов и количества атмосферных осадков на кинематические характеристики оползневых смещений. Определена кинематическая модель оползневого склона и на её основе обоснованы параметры оползневых процессов и методика для их прогноза.

Для ученых, преподавателей и специалистов, занятых изучением оползневых процессов, проектированием и строительством на территориях с неблагоприятными природными условиями.

УДК528.481
ББК 33.131

ISBN 978-966-350-480-3

© А.В. Зуска, 2014

© Державний ВНЗ «НГУ», 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ.....	7
1. ИЗУЧЕННОСТЬ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ ЕСТЕСТВЕННЫХ СКЛОНОВ, СЛОЖЕННЫХ ЛЁССОВЫМИ ПОРОДАМИ	9
1.1. Виды оползней, образующихся в связных породах.....	9
1.2. Основные факторы, формирующие оползневые процессы.....	13
1.3. Анализ основных методов оценки устойчивости склонов.....	17
1.4. Натурные инструментальные методы изучения оползневых процессов	19
1.5. Методы геометризации геологических процессов	21
2. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА УСТОЙЧИВОСТЬЮ ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ	23
2.1. Анализ оползней на склонах балок г. Днепропетровска.....	23
2.2. Инженерно-геологические и гидрогеологические характеристики оползневых склонов	28
2.3. Особенности построения специальных опорных сетей наблюдательных станций на оползневых участках “Сокол” и “Сирко”.....	35
2.4. Методы наблюдений сетей наблюдательных станций. Точность измерений и результатов уравнивания	39
2.5. Методика натурных геодезических наблюдений оползневых процессов на участках “Сокол” и “Сирко”.....	40
2.6. Исследование кинематических характеристик оползневых смещений... ..	44
3. ГЕОМЕТРИЗАЦИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ.....	61
3.1. Геометризация параметров оползневого процесса во взаимосвязи с инженерно-геологическим строением склона	61
3.1.1 Пространственно-временные графики равных осадок.....	61
3.1.2. Планы распределения скоростей оползневого процесса.....	64
3.1.3. Гипсометрические планы геометрических параметров строения склонов	70
3.1.4 Планы векторов горизонтальных смещений оползневых точек.....	76
3.2. Исследование объема смещающихся масс на оползневом склоне.....	81
3.2.1. Методы определения объема смещающихся масс горных пород.....	85
3.2.2. Определение объема смещающихся масс с использованием программы Surfer.....	88
4. ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ.....	91
4.1. Изучение оползневого процесса с использованием математико-статистических приемов.....	91
4.2. Влияние атмосферных осадков на развитие оползневого процесса.....	91
4.3. Исследование взаимосвязи между изменением скорости смещений, объемом смещающихся масс и атмосферными осадками.....	95
	101

5. ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ОПОЛЗНЕВОГО ПРОЦЕССА НА ОСНОВЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВО ВРЕМЕНИ.....	106
5.1. Динамические ряды кинематических характеристик смещений.....	106
5.2. Взаимосвязь между параметрами оползневого процесса и инженерно-геологическими элементами строения склона.....	115
5.3. Прогноз ожидаемых параметров оползневых процессов с учетом геометрии строения склонов.....	122
5.4. Многофакторный корреляционно-регрессионный анализ.....	127
5.5. Методика прогноза параметров оползневого процесса на основе кинематической модели.....	131
Список литературы.....	135

ВВЕДЕНИЕ

Проблема использования земель с неблагоприятными условиями сегодня становится все более актуальной. Среди таких земель значительный процент занимают земли овражно-балочной системы, которая нарушает компактность застройки населенных пунктов. В частности, территория города Днепропетровска характеризуется высоким уровнем развития геомеханических процессов, среди которых доминирующими являются оползни, занимающие более 105 га площади правобережной части города. Ими деформированы, повреждены и разрушены частные жилые дома и высотные здания на склонах балок Аптекарская, Войцеховича, Встречная, Евпаторийская, Красноповстанческая, Тоннельная, подвержен разрушениям и деформациям поселок Новый на склонах балки Сухой Овраг и т.д.

В результате влияния техногенных факторов происходит нарушение сбалансированного в природе равновесия при активизации процессов подтопления и оползневых явлений, что имеют распространение более чем на 60 % площади всей территории Украины. Оползневые процессы тесно связаны с рельефом земной поверхности и в большинстве случаев приурочены к склонам долин рек, балок и оврагов. Например, для города Днепропетровска, расположенного на трех холмистых поднятиях, окруженных большим количеством балок и оврагов, проблема устойчивости застроенных естественных склонов приобретает большое социальное и народно-хозяйственное значение. Развитие оползневых процессов на территории города приурочено к эрозионной системе правобережья р. Днепр, где сосредоточены 15 крупных балок и более 20 оврагов, занимающих площадь 5000 га.

Таким образом, целью исследования устойчивости склонов и эффективности противооползневых мероприятий, проводимых для их предупреждения, кафедра геодезии Национального горного университета вела многолетние наблюдения (1984 – 2001 гг.) за естественными склонами городских балок на двух оползневых участках.

Хотя вопросам оползнеобразований, происходящих как в крупных городах, так и при открытой разработке месторождений, посвящено много исследований, разработано немало методов расчета устойчивости бортов карьеров, уступов и естественных склонов. Однако эти методы касаются расчетов, выполненных в одной или нескольких плоскостях сдвигающегося массива и только по разрезам. При этом не учтено взаимное влияние таких факторов, как форма и условия залегания пород строения склона (геометрические параметры инженерно-геологических элементов), кинематические характеристики оползневых смещений точек (параметры оползневого процесса) на различных участках поверхности склона и климатические условия.

Ранее разработанные методы прогноза устойчивости склонов не учитывают кинематику смещающегося массива, что может быть получено на основании взаимосвязи геологического строения склона и кинематических характеристик оползневых смещений. Следовательно, определение и обоснование параметров

кинематической модели для прогноза оползневых процессов естественных склонов – актуальная научно-техническая задача.

Монография является результатом многолетних научно-исследовательских работ хозяйственных тем кафедры геодезии ДГИ, в которых автор принимала непосредственное участие: 1984 – 1991 гг. – тема “Исследование динамики смещений на естественных склонах в регионе Днепропетровска”, ДР № 0185u000176 и № 0184u057740; 1991 – 1993 гг. – тема “Исследование динамики смещений на естественных склонах в регионе Днепропетровска”, ДР № 0188u028880; 1996 – 2001 гг. – тема “Наблюдение за противооползневыми мероприятиями на микрорайоне “Сокол” с целью исследования их эффективности и устойчивости оползневого склона”, ДР № 0198u050208.

Предлагаемая книга не исчерпывает всех проблем развития геомеханических процессов. Однако она будет полезна при проектировании зданий и сооружений на естественных склонах, сложенных лёссовыми породами, интересна широкому кругу читателей, чья профессиональная деятельность связана с защитой территорий от ситуаций техногенного и природного характера, а также студентам и аспирантам при изучении геомеханических процессов, охране и мониторинге земель.

Автор выражает благодарность преподавателям и сотрудникам кафедры геодезии, которые принимали участие в организации, подготовке и проведении натуральных геодезических наблюдений на оползневых участках “Сокол” и “Сирко”: А.И. Осецкому, П.Е. Курочкину, А.Г. Бондаруку, В.А. Рябчию, А.И. Погорелову, Е.Д. Буцу, С.Г. Ткачу, Д.Е. Патенко, М.К. Аверину, Г.В. Токме, О.И. Толстореброву и др., а также лично благодарит кандидата технических наук, профессора кафедры мажшейдерии Т.Г. Николаеву и доктора технических наук, профессора, заведующего отделом геомеханических основ технологий открытой разработки месторождений института геотехнической механики им. М.С. Полякова НАН Украины М.С. Четверика.

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ

Геодезические методы наблюдения оползневого процесса – определение взаимного положения точки на земной поверхности в пространстве и во времени.

Геологическое строение склонов – условия залегания горных пород и их литологический состав, характер напластований, гранулометрический, минералогический и химический состав пород, их структура и текстура.

Геометризация кинематической модели – изображение изолиниями количественной и качественной изменчивости параметров оползневого процесса.

Геометризация месторождения – совокупность полевых наблюдений, измерений, вычислений и графических построений, проводимых с целью геометрического изображения форм залежей месторождений полезных ископаемых, условий их залегания, пространственного распределения свойств полезных ископаемых и процессов, происходящих в недрах.

Геометрия недр – горная геометрия это раздел горной науки о геометрическом моделировании формы залежи, свойств (качества) полезных ископаемых и процессов, происходящих в недрах, методах подсчёта и управления запасами, методах решения геометрических задач, связанных с проведением горных работ.

Геометрические параметры инженерно-геологического строения склона – форма и условия залегания горных пород.

Геоморфологические условия – крутизна и конфигурация склонов, степень расчлененности их оврагами и балками.

Гидрогеологические условия – наличие водоносных горизонтов, оказывающих влияние на обводнение горных пород и образование суффозионных и диффузионных явлений.

Гипсометрический план – изображение геометрических параметров инженерно-геологического строения массива.

Глетчeroобразная форма оползней – оползни-потоки глетчeroобразно вытянуты вдоль понижений (ложбин стока), спускающихся со склона.

Динамический план – изображение изменений параметров оползневых процессов во времени.

Индекс обводнения – степень обводнения склонов на предельную (максимальную) мощность покровных образований.

Изогипса (горизонталь) – изолинии одинаковых высот.

Изолиния или линия уровня (функции) – условное обозначение на карте, чертеже, схеме или графике, представляющее собой линию, в каждой точке которой измеряемая величина сохраняет одинаковое значение.

Кинематическая модель – параметры оползневого процесса и геометрические параметры геологического строения склона в комплексе.

Кинематические характеристики оползневых смещений – величины пространственных смещений точек склона за определенный промежуток времени.

Оползень – связанное движение земляных масс или скальных пород, совершающееся по некоторой поверхности скольжения.

Параметры кинематической модели – кинематические характеристики оползневых смещений в пространстве за определенный период времени во взаимосвязи с геометрическими параметрами геологического строения массива.

Пространственно-временные графики равных осадок – изображение изолиниями характера деформации поверхности склона во времени.

Форма очертаний оползней – расположение стенки отрыва по отношению к склону.

Фронтальная форма оползня – главный и внутренний уступы вытянуты вдоль склона на значительные расстояния.

Циркообразная форма оползня – главный и внутренний уступы стенки отрыва полукругом окаймляют понижение, образуя амфитеатр.

1. ИЗУЧЕННОСТЬ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ ЕСТЕСТВЕННЫХ СКЛОНОВ, СЛОЖЕННЫХ ЛЁССОВЫМИ ПОРОДАМИ

1.1. Виды оползней, образующихся в связных породах

Оползневые процессы, условия их возникновения и развития, методы натурных измерений, прогноз и меры борьбы с ними изучали: П.И. Брайт [73, 74], М.Н. Гольдштейн [16, 40], К.А. Гулакян [13, 17], Е.П. Емельянова [6, 38, 39], Г.С. Золотарев [12, 18], П.Г. Келль [52], В.В., Н.Н. Маслов [31], Г.П. Постоев [48, 56], Е.М. Сергеев [5], Г.И. Тер-Степанян [32, 54, 55], К.Терцаги [29], В.С. Федоренко [9], К.Ш. Шадунц [15, 25,47], Г.М. Шахунянц [35], А.И. Шеко [1, 2, 3, 4, 8], Р. Шустер [7] и другие учёные.

В основном оползневые процессы происходят исключительно на склонах и откосах, в строении которых принимают участие глинистые и лёссовидные породы. Оползни опасны для всех видов зданий и инженерных сооружений, расположенных на склонах. Они представляют собой связанное движение земляных масс или скальных пород, совершающееся по некоторой поверхности скольжения. Наибольшее развитие и широкое распространение оползни имеют в связных породах (в глинах, суглинках, лёссах, глинистых мергелях и т. п.) на естественных склонах и в откосах выемок. Существующее множество оползней различается размерами, формой, глубиной захвата и формой поверхности скольжения, характером смещения земляных масс, их скоростью, периодичностью, состоянием поверхности, условиями видимости и т. д.

Для практических целей все известные оползни, образующиеся на естественных склонах, разделены на три группы [10]:

- в однородных связных породах (в глинах, суглинках, лёссах, глинистых мергелях и т. п.);
- в связных породах, залегающих в виде пластов с хорошо выраженными поверхностями напластования;
- в связных породах, залегающих в чередовании с пластами и линзами водоносного песка.

Каждая из этих групп объединяет собою несколько видов оползней, отличающихся друг от друга как по структуре оползневых склонов, по характеру оползневых процессов, так и по механизму их развития [48] (рис. 1.1).

В состав первой группы оползней, образующихся в однородных связных породах, входят структурные, просадочные, пластические (консистентные) и оползни-обвалы.

Структурные оползни – смещение земляных масс по явно выраженной криволинейной поверхности скольжения. Смещающиеся массы земли почти не изменяют первоначальной структуры и не образуют у подошвы склонов хаотических нагромождений сползшего грунта, оползневых гряд-валов, бугров. Оползни данного вида возникают в основном на естественных склонах возвышенностей, в котлованах, в глубоких разрезах для открытой разработки месторождений полезных ископаемых, насыпях.

Площадь распространения структурных оползней обычно небольшая, однако на крутых склонах и в прибрежных зонах она может быть очень большой.

Мощность оползневого массива довольно велика. В глубоких выемках и на крутых склонах оврагов и берегов рек она нередко достигает 1/5 длины оползня, в разрезах глубина захвата бывает больше его длины.

Скорость движения оползневого массива неравномерная. Максимальная скорость достигается в начальный период развития оползневого процесса, а с течением времени она постепенно затухает. При своевременном осуществлении противооползневых мероприятий структурные оползни переходят в стабильное состояние и редко возобновляются.

Оползни проседания – смещение пород на крутых участках естественных склонов вначале в вертикальном направлении, а затем в направлении склона (рис. 1.1). Эти оползни образуются в лёссах и лёссовидных суглинках, имеющих широкое распространение на Украине. Лёсс и лёссовидные суглинки от других пород отличаются большой однородностью и мелкозернистостью с преобладанием фракций 0,01 – 0,005 мм в диаметре.

Процесс деформации развивается более интенсивно, если одновременно с обводнением лёссовых пород на поверхности земли происходит увлажнение их снизу, при повышении уровня подземных вод.

При обводнении залегающих у основания толщи лёссовых пород, мелкозернистых пылеватых песков вследствие действия внешних вод или при движении в них подземных вод развиваются суффозионные процессы. В этих случаях оползневые деформации склонов происходят не только в связи с уплотнением лёссовых пород и нарушением в них структурных связей, но и с массовым выносом разжиженного мелкозернистого пылеватого песка из основания толщи лёсса. В образовании оползней типа **суффозионно-просадочных** большую роль играет искусственное обводнение лёссовых и лёссовидных суглинков на склонах из водопроводов, канализации и открытых водотоков.

Пластические или консистентные оползни образуются на склонах в связи с изменением естественной структуры и консистенции глинистых пород, слагающих естественные склоны возвышенностей или откосы искусственных земляных сооружений. Глины под воздействием воздуха и атмосферных осадков, а также резких колебаний температуры интенсивно выветриваются и становятся неустойчивыми. Нарушенные выветриванием глинистые породы легко переходят из твердого и рыхлого в пластическое и текучее состояние и начинают сползать по наклонной поверхности склона даже при небольшой его крутизне.

Скорость смещения земляных масс данного типа оползней в вертикальной плоскости неодинакова: на поверхности скорость смещений наибольшая, а с увеличением глубины она постепенно затухает.

Если глинистые породы на склоне увлажнены атмосферными осадками во время дождей или таяния снега, то скорость смещающихся масс в зоне, ближайшей к дневной поверхности, может превысить скорость смещения их в нижележащую зону. В этом случае смещающиеся массы грунта движутся по нескольким поверхностям скольжения, как бы опережая друг друга. При очень

большом увлажнении грунтов (более 45 %) оползни пластические переходят в оползни-обвалы.

Оползни-обвалы образуются в водонасыщенных рыхлых глинистых породах, которые подвергаются интенсивному выветриванию на крутых участках склона. Поверхность скольжения в оползнях этого типа выражена достаточно четко. В верхней части оползневого массива она обычно проходит по границе между рыхлыми породами элювиальной зоны и коренными породами, в нижней – поверхностью скольжения служит дневная поверхность склона.

На крутых участках естественных склонов при водонасыщении почвенно-растительного слоя и рыхлых недоуплотненных пород образуются **оплывины**.

В состав второй группы оползней в связных породах, залегающих в виде пластов с хорошо выраженными поверхностями напластования, входят оползни трех видов: **контактные (скольжения); срезающие (скальвающие); структурно-пластические (выдавливания)** (рис. 1.1).

Контактные (скольжения) оползни образуются на естественных склонах возвышенностей, долин рек и косогорах, сложенных слоистыми породами, у которых падение слоев направлено в сторону склона. В зависимости от высоты расположения поверхности скольжения над подошвой склона и от его крутизны оползни могут переходить в оползни-обвалы. Поверхностью скольжения является плоскость напластования, которая предопределена геологическим строением оползневого участка. Сползает обычно один либо одновременно несколько слоев, в зависимости от того, в какой последовательности залегают смещающиеся породы. Скольжение по чистым, лишенным глинистой промазки плоскостям напластования может вызвать гидростатическое боковое давление подземных вод, заполняющих трещины в породах, или одну только добавочную нагрузку.

Срезающие или скальвающие оползни – смещение земляных масс по криволинейной поверхности скольжения, близкой к крутой логарифмической кривой, почти вертикальной у поверхности земли и почти прямолинейной у подошвы склона. В верхней части склона поверхность скольжения скальвает напластования различных по возрасту связных пород, в том числе нередко и скальных. В нижней – она переходит в плоскость напластования с прямолинейным очертанием, если в основании сползающих пород залегают плотные твердые. Если же в основании залегают мягкие глинистые породы, то поверхность скольжения имеет криволинейное, но более пологое очертание. Оползни данного вида образуются на естественных склонах возвышенностей и долин рек, сложенных слоистыми породами, залегающими горизонтально или с уклоном, противоположным склону.

Структурно-пластические оползни (выдавливания) – смещение земляных масс в результате пластического изменения формы мягких глинистых пород под влиянием вертикального давления, которое создают вышележающие более твердые породы. Оползни такого типа имеют широкое распространение на крутых берегах Днепра, Днестра, Дуная и других рек, а также склонах балок. Структурно-пластические оползни с течением времени по мере разрушения и

сползания твердых пород верхнего слоя к подошве склона могут перейти в оползни пластического типа.

№ п/п	Название оползня по его механизму смещения	Типовые схемы
1	Скольжение	
2	Выдавливание	
3	Выпльвание	
4	Течение	
5	Проседания	
6	Разжижение	

Рис. 1.1. Классификация оползней по механизму нарушения равновесия массива пород

Оползни, залегающие в связных породах, чередующихся с пластами и линзами водоносного песка входят в состав третьей группы и делятся на: **суффозионно-структурные, суффозионно-пластические и суффозионно-просадочные**. Они значительно отличаются от описанных выше по структуре оползневого склона и характеру развития оползневых процессов. Склоны, на которых образуются оползни указанной группы, по своему строению разделяются на два вида:

– сложенные глинами, мергелями, известняками, песчаниками и водоносными песками, залегающие в виде хорошо выраженных горизонтальных или наклонных слоев;

– сложенные глинистыми породами с невыдержанными элементами залегания.

В первом случае, при наличии одного водоносного слоя в толще горных пород, слагающих склон, образуются простые или одноярусные оползни, а при наличии нескольких слоев – сложные или многоярусные. В оползневых процессах могут участвовать либо верхний глинистый, либо суглинистый слой, сползающий по первому от поверхности песчаному слою, насыщенному грунтовыми водами, либо сразу несколько слоев, сползающих по одному или нескольким из нижезалегающих слоев.

Во втором случае водоносный песок залегает в слоях глины в виде отдельных прослоек и линз или, наоборот, глина и суглинки залегают в виде неправильных линз. Таким образом, водой насыщается вся глинисто-песчаная толща, представляющая собой водоносный горизонт с сохранением гидравлической связи в грунтовом потоке во всех ее частях. Меры борьбы с оползнями, образующимися в породах с несколькими водоносными горизонтами, будут несколько иными, более сложными, чем для случаев с одним водоносным горизонтом.

1.2. Основные факторы, формирующие оползневые процессы

Развитие оползневых процессов тесно связано с факторами, формирующими их образование. Разработанная А.И. Шеко классификация оползнеобразующих факторов делит их на три группы: постоянные, медленноизменяющиеся и быстроизменяющиеся [4].

Е.М. Сергеев [5] выделяет две основные группы факторов, определяющих инженерно-геологический тип территории: **региональные геологические** и **зональные геологические**. В связи с возрастающей инженерной деятельностью и сельскохозяйственным освоением земельных угодий увеличиваются объемы искусственных грунтов, в которых развиваются разнообразные оползневые процессы.

Е.П. Емельянова считает, что типы, виды и даже разновидности оползней определяются в основном **геологическими условиями** склонов, на которых они образовались. Большое влияние на развитие оползней оказывают условия залегания пород, которые играют важную роль и в процессе их разрушения [6].

Характер и интенсивность развития оползневых процессов в высшей степени зависят от **направления падения горных пород** по отношению к склону. На склонах, где падение пород совпадает с направлением склона, развиваются консеквентные оползни, часто в виде смещения пачек пластов по напластованию.

В работах А.И. Шеко, Е.М. Сергеева, Е.П. Емельяновой и др. указано, что одним из важнейших факторов является **рельеф**, определяющий интенсивность проявления оползневых процессов и оказывающий значительное влияние на их генетические особенности. Он воздействует на мощность и состав покровных образований, увлажненность территории, концентрацию поверхностного стока, потенциальную энергию, сдвигающие усилия и т.д. [4, 5, 6].

По мнению Е.П. Емельяновой, существует взаимосвязь между крутизной склонов, мощностью и составом покровных образований, гидрогеологическими

условиями и типом поверхности смещений. Другими словами, чем больше мощность покровных образований для данного значения крутизны склона, тем выше вероятность возникновения оползней.

Основными факторами влияния на оползни являются **увлажненность территории, уклоны и расчлененность рельефа**. При увеличении уклонов и расчлененности рельефа количество осадков на единицу площади территории уменьшается, т. е. происходит возрастание общих сдвигающих усилий или касательных напряжений: $T = P \sin \alpha$, где P – масса массива оползневых пород [6]. А.И. Шеко исследовал оползневые склоны Черноморского побережья Крыма и Кавказа и пришел к выводу, что более активное развитие оползневых процессов происходит на молодых склонах [8].

Анализ элементов инженерно-геологического строения склонов показал, что большинство оползневых процессов встречаются на склонах и уступах крутизной от 3 – 7 до 50 – 60° – оползни **разжижения** (см. рис. 1.1). В зависимости от конкретных геологических условий для каждого региона, района, склона существует сравнительно узкий интервал значений, характеризующийся наибольшей вероятностью проявления оползней.

Влияние высоты и крутизны склонов на объемы оползней в палеозойских песчаниках и сланцах долин боковых притоков среднего Заравшана (Таджикская Республика) исследовал В.С. Федоренко [9]. В оползневом процессе повышенное количество осадков и определенный режим их выпадения способствуют нарушению устойчивости склонов.

Исследования Р.А. Ниязова и других, проводимые на горных склонах Четкало-Кураминской зоны в лессовых породах, показали, что наиболее значительное нарушение устойчивости склонов происходит вследствие **ливневых осадков**, увлажняющих породы по трещинам, служащим естественными водосборниками атмосферных осадков. Продолжительные дожди особенно опасны для рыхлых глинистых пород. В результате таких дождей изменение влажности повышает плотность пород (иногда на 20 – 30 %) и уменьшает сопротивление их сдвигу на 50 % и более, что приводит к потере устойчивости [19].

Режим и степень увлажнения территории, температуры воздуха, а соответственно и характеристика оползневого процесса отличаются в районах с разным климатом. По климатическому районированию развитие оползневых процессов зависит, главным образом, от степени увлажнения территории, поскольку вызвано интенсивными ливнями, оказывающими большое размывающее действие.

Г.С. Золотарев считает, что “главное и наиболее существенное воздействие подземных вод – это снижение прочности массива пород, особенно по контактам, где имеются скопления глинистого материала” [12].

По мнению Е.П. Емельяновой, “подземные воды влияют на величину напряжений и на прочность пород” [6]. Развитие оползневых процессов зависит от положения **уровня подземных вод** по отношению к основному деформируемому горизонту или поверхности скольжения. Активизация оползней в лессовых породах связана с периодом подъема уровня подземных вод.

Оползни возникают в результате **обводнения лессовых пород** напорными водами из тектонических зон в местах их выклинивания. Большой интерес

представляет влияние степени обводнения склонов на предельную (максимальную) мощность покровных образований. Степень обводнения характеризуется индексом обводнения $I_{обв} = \frac{a}{h}$, где a , h – мощности водоносного горизонта и покровных образований соответственно [38, 39].

Обводнение склонов связано не только с особенностями гидрогеологических условий, но и с увлажнением склонов атмосферными осадками, количество которых распределяется в зависимости от географического расположения районов, мм/год: Средняя Азия – 300 – 400; Южный берег Крыма 500 – 600; Сочи – 1200 – 1400 [4, 20, 23], Днепропетровск – 420–520 [26].

Г.С. Золотарев считает, что “главное и наиболее существенное воздействие подземных вод – это снижение прочности массива пород, особенно по контактам, где имеются скопления глинистого материала” [12].

Самым сложным и многообразным фактором является **растительность**. Влияние растительности на оползневые и селевые процессы описано в работах Е.П. Емельяновой [6], А.И. Шеко [4] и др.

Растительность влияет на характер зависимости между крутизной склона и предельной мощностью покровных образований. Однако существенное действие растительность оказывает на такой важный фактор, как **эрозия склонов** [6].

А.Г. Шеко в работе [3] отмечает: “Н. Гудзону удалось выявить связь между интенсивностью проявления эрозионных процессов и **годовых осадков** при случае сохранения естественной растительности и при ее удалении. С увеличением годовых осадков до 600 – 900 мм возрастает и интенсивность эрозионных процессов. При увеличении годовых осадков интенсивность эрозии снижается из-за формирования растительного покрова, препятствующего ее развитию”. Густой, высокий травяной покров, если он ориентирован вниз по склону, может создать эффект “крыши“, резко уменьшая свою задерживающую способность и увеличивая поверхностный сток”.

Развитие оползневых процессов связано с промерзанием и протаиванием горных пород. Важнейшими факторами, определяющими глубину промерзания, являются **степень и продолжительность охлаждения**. Мощность промерзания составляет от нескольких сантиметров (кратковременно мерзлые) до нескольких метров (сезонно мерзлые породы).

Влияние **деятельности человека** на развитие оползней и всех других экзогенных геологических процессов становится все более сильным, масштабным и многогранным [27, 28].

С учетом вышесказанного и [10] выделены основные факторы образования оползней указанных видов в связанных породах и выбраны основные противооползневые мероприятия (табл. 1.1).

Таблица 1.1

**Основные виды оползней, факторы их образования
и противооползневые мероприятия**

Группа	Структура склонов	Виды оползней	Основные факторы образования оползней	Основные противооползневые мероприятия
1	2	3	4	5
I	Однородные связные глинистые породы (глины, суглинки, лёсы, глинистые мергели и т.п.)	Структурные	<ol style="list-style-type: none"> 1. Чрезмерная крутизна склона. 2. Перегрузка склона отвалами или сооружениями. 3. Нарушение целостности пород на склоне траншеями, нагорными канавами или оврагами. 4. Подрезка склона. 5. Увлажнение подошвы склона 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Разгрузка склонов путем их уположения или террасирования. 2. Поддерживающие сооружения в виде подпорных стен, контрбанкетов и т.п. 3. Контрфорсные дренажи
		Просадочные	<ol style="list-style-type: none"> 1. Перегрузка макропористых пород отвалами и сооружениями при одновременном их увлажнении атмосферными осадками и хозяйственными водами. 2. Переувлажнение макропористых пород поверхностными и подземными водами 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Разгрузка склонов. 2. Защитные покрытия на склонах и осушение пород. 3. Закрепление пород обжигом и прогреванием (термомелиорация)
		Пластические и оползни-обвалы	<ol style="list-style-type: none"> 1. Перегрузка и подрезка склонов. 2. Интенсивное выветривание горных пород на склонах. 3. Образование усадочных трещин. 4. Увлажнение грунтовых масс атмосферными осадками. 5. Увлажнение и разупрочнение грунтов при промерзании и оттаивании 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Разгрузка, уположение, террасирование и планировка склонов. 2. Устройство защитных покрытий шлака, шлакоглинобетона, растительного грунта и других материалов на поверхности оползневых склонов. 3. Закрепление склонов древесной и кустарниковой растительностью с посевом многолетних дернообразующих трав. 4. Закрепление грунтов обжигом и прогреванием, палями любой конструкции. 5. Закрепление склонов цементолёссовыми палями с использованием струнной технологии
II	Связные породы, залегающие в виде пластов с хорошо выраженными поверхностями напластования	Контактные и срезающие	<ol style="list-style-type: none"> 1. Чрезмерно крутое падение. 2. Перегрузка склона отвалами или сооружениями. 3. Нарушение целостности пород на склоне траншеями, нагорными канавами или оврагами. 4. Подрезка склонов. 5. Смачивание плоскостей напластования (контактов) подземными водами 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Разгрузка верхних частей склона. 2. Поддерживающие сооружения (подпорные стены, контрфорсные столбы, шпоны, банкетты, пали). 3. Заградительный дренаж (при наличии подземных вод)

1	2	3	4	5
II	Связные породы, залегающие в виде пластов с хорошо выраженными напластованиями	Структурно-пластические (выдавливания)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Неравномерная разгрузка горных пород, залегающих над пластичными глинами. 2. Перегрузка склона отвалами или сооружениями. 3. Увлажнение глинистых грунтов в основании склонов 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Разгрузка, террасирование склонов. 2. Призмы противодействия (контрбанкеты). 3. Закрепление грунтов обжигом и прогреванием. 4. Закрепление склонов цементолёссовыми палями с использованием струнной технологии

1.3. Анализ основных методов оценки устойчивости склонов

Методы прогноза оползней тесно связаны с методами оценки устойчивости склонов. Только располагая характеристикой устойчивости склона в настоящее время и предвидя ее будущее изменение, можно предсказать развитие оползня на том или ином склоне.

Известно более 300 методов и приемов расчета устойчивости природных и техногенных склонов. Исследованиям напряженного состояния и устойчивости горного массива посвятили свои работы ученые: В.Г. Березанцев [30], М.Н. Гольдштейн [40], В.В. Голуб [46], А.М. Демин [42], А.Г. Дорфман [37], Е.П. Емельянова [38, 39], Н.Н. Маслов [31], Е.А. Несмашный, Ю.М. Николашин [44, 45], Г.И. Тер-Степанян [32], Терцаги Крей [29], Ю.В. Соловьев [33], И.В. Федоров [34], В.К. Фисенко [36], Г.М. Шахунянц [35] и др.

Среди методов расчета с плоскими моделями геомеханических объектов можно выделить несколько характерных групп. Одну из них составляют методы, основанные на положениях теории предельного равновесия и заключающиеся в совместном решении дифференциальных уравнений, а также условия предельного равновесия.

Ю.И. Соловьев [33] получил уравнение экстремальной поверхности сдвига, т. е. поверхности с наименьшим сопротивлением сдвига или наименьшим коэффициентом запаса устойчивости:

$$\frac{C}{\gamma z} = [tg(\varphi) + ctg(\Theta)] \cos^2(\Theta),$$

где φ – угол внутреннего трения пород; z – глубина прохождения поверхности сдвига в массиве откоса; Θ – угол наклона площади сдвига к горизонту.

И.В. Федоров [34] предложил учитывать распределение давления по боковой поверхности отсеков. Этот метод позволяет оценить устойчивость откосов, состоящих из нескольких уступов.

Метод “оползневого давления”, разработанный Г.М. Шахуняцем [35], дает наглядное представление о распределении напряжений в откосе. Если поверхность смещения имеет форму плоскости, то коэффициент устойчивости можно найти из отношения удерживающих сил, действующих в плоскости возможного смещения, к силам сдвигающим, т. е.

$$K = \frac{T_{уд}}{T_{сдв}} = \frac{F + C}{T_{сдв}} = \frac{f}{\operatorname{tg}(\beta + \Theta)} + \frac{Cl}{Q_0 \sin(\beta + \Theta)},$$

где F – равнодействующая сил трения, равная fQ_0 и действующая в плоскости AB ; Θ – угол наклона равнодействующей сил к вертикали; β – угол наклона плоскости скольжения к горизонту; Q_0 – вес призмы обрушения; Cl – равнодействующая сил сцепления в той же плоскости и

$$T_{сдв} = Q_0 \sin(\beta + \Theta).$$

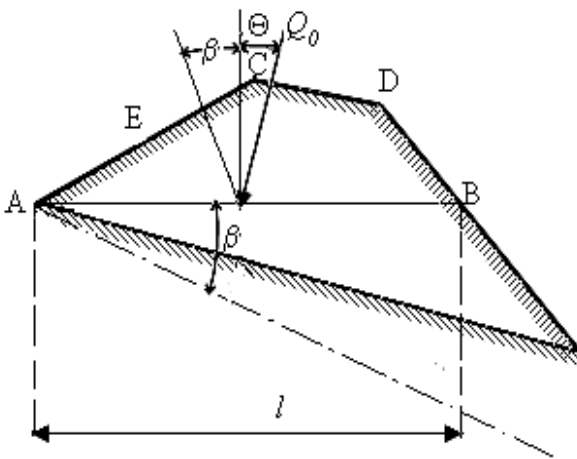


Рис. 1.2 Схема призмы обрушения

Задавая различные значения β , находят: при каком значении $\beta = \beta_0$ коэффициент устойчивости будет $K = \min$. Это значение K будет искомым, а плоскость, наклонённая к горизонту под углом $\beta = \beta_0$, называется критической.

В ряде случаев минимальное значение K может быть определено аналитически.

$$\text{Если } \frac{dK}{d\beta} = 0 \text{ и } \frac{d^2K}{d\beta^2} \leq 0, \text{ то } K = \min.$$

Для случая, показанного на рис. 1.2, вес призмы обрушения (заштрихованный) определится по формуле

$$Q_0 = \gamma w = \frac{1}{2} \gamma h l \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin \alpha},$$

где γ – объемный вес грунта; w – объем грунта; α – угол наклона откоса; β – угол поверхности скольжения.

Е.П. Емельянова рассмотрела теоретические основы сравнительного метода для оценки устойчивости склонов и прогноза оползней. Предлагаемый метод основан на установлении зависимости между основными характеристиками склонов, характеризующихся различным геологическим строением и различными

видами нарушения устойчивости. В результате рекомендовано, что для прогноза возникновения оползневого смещения необходимо знать устойчивость склона в настоящее время, и могут ли и при каких условиях процессы, воздействующие на склон или проектируемые в зоне склона изменения, довести его устойчивость до предельного состояния [38].

Основные методы расчета устойчивости откосов и склонов основываются на случаях, когда поверхность скольжения принята за плоскость или за поверхность круглого цилиндра или за поверхность любого очертания, если оно известно. Нарушение устойчивости откосов или склонов происходит по произвольной линии скольжения, то для анализа таких случаев используется метод сил. При известной поверхности возможного смещения расчет устойчивости массива целесообразно вести методом многоугольников сил [40, 41].

Для определения реакции подпорной стены (равной по величине и обратной по направлению давления грунта на стену) весь массив разбивается на ряд отсеков. Преимущество методов отсеков в том, что они статистически точные, т. е. удовлетворяют всем условиям равновесия. К таким методам относятся методы, разработанные А.Г. Дорфманом, А.М. Деминым, В.В. Голубом, Ю.М. Николашиным и рядом другими учеными [37, 42, 45, 46].

Указанные методы оценки устойчивости склонов и прогноза оползневых процессов не учитывают геометрических параметров инженерно-геологического строения, значения которых различны в разных точках поверхности склона.

1.4. Натурные инструментальные методы изучения оползневых процессов

Развитие инженерной геодинамики основывается на трудах таких известных ученых, как П.И. Брайт [53], А.Г. Григоренко [57], К.А. Гулакян [64, 66], Е.П. Емельянова [51], Н.Г. Келль [52], Р. А. Ниязов [49], Г.П. Постоева [56], И. О. Тихвинский [58, 59], Г.И. Тер-Степанян [55], А.И. Шеко [4] и др.

Наблюдения за оползневыми явлениями, устойчивостью склонов, откосами, уступов карьеров – один из основных методов инженерной геодинамики, основными задачами которых является определение взаимного положения точек на земной поверхности в пространстве и во времени, а также изучение закономерностей перемещений и эффективности противооползневых мероприятий.

Натурные инструментальные наблюдения за развитием оползневых деформаций – часть режимных наблюдений при исследовании протекания оползневых процессов. Преимущество их заключается в возможности получить величины абсолютных оползневых смещений. Инструментальные наблюдения применяются для оценки динамики оползневых склонов, деформации зданий, устойчивости и эффективности противооползневых сооружений.

Наиболее широко используют геодезические методы наблюдений, главная задача которых состоит в определении пространственного положения точек земной поверхности, а также элементов зданий и сооружений, расположенных на ней. Перемещение оползневой поверхности во времени характеризуется двумя видами движений – поступательным и вращательным. В интерпретации с точки

зрения инженерной геодинамики, переходя к координатам какой-либо точки поверхности склона, расстояние l , пройденное точкой за промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$, можно будет найти по формуле

$$l = \sqrt{[x(t_2) - x(t_1)]^2 + [y(t_2) - y(t_1)]^2 + [z(t_2) - z(t_1)]^2},$$

где $x(t_1)$, $y(t_1)$, $z(t_1)$ – координаты некоторой точки склона в момент времени t_1 ; $x(t_2)$, $y(t_2)$, $z(t_2)$ – координаты той же точки в момент времени t_2 [85].

Результаты смещения земной поверхности в пространстве и во времени дают возможность определить механизм оползней. В большинстве случаев смещение склонов, откосов и уступов представляет собой длительный процесс, в котором различают два этапа фазы:

подготовительная – происходит медленное движение типа ползучести и формируется поверхность скольжения;

катастрофическая – быстрые движения по сформировавшейся поверхности скольжения.

По величине смещения разделяют на две группы: микро- и макросмещения.

Микросмещения непосредственно не ощущаются и не проявляются в виде каких-либо качественных изменений на склоне и в расположенных на нем объектах.

Макросмещения сопровождаются качественными изменениями: трещины в зданиях и сооружениях, дорожных покрытиях; перекосы конструкций и т.д.

Для получения достоверной информации о динамике оползней большую роль играет выбор места заложения опорных (стабильных) и оползневых (подвижных) точек, а также выбор метода геодезических наблюдений [50].

Наблюдения смещений пунктов, установленных на оползнях, относятся к разряду точных геодезических работ. Методы наблюдений и способ обработки результатов смещений точек в плане и в пространстве выбирают с учетом условий местности.

Н.Г. Келль и А.Н. Белоликов предложили дифференциальный метод [52]. Положение оползневой точки этим методом определяется прямыми, обратными и смешанными засечками. В результате построений находят смещение оползневой точки относительно первоначального ее положения и графически определяют искомый вектор смещения. Данный метод простой в применении, не требует создания высокоточной опорной сети и больших вычислительных работ, однако определение положения точек на застроенной территории этим способом ограничено из-за видимости. П.И. Брайт систематизировал методы измерения горизонтальных и вертикальных смещений на оползнях. А это значит, что положение наблюдательных пунктов, установленных на сооружениях для измерения смещений, может определяться с ошибкой не более 10 мм в плане и 2 мм по высоте, а наблюдательных пунктов, расположенных на поверхности оползней – 50 в плане и 10 по высоте [53]. Указанные точности не дают возможности обнаружить микро-

смещения оползневых точек и исследовать причины, способствующие их смещению.

Из анализа натуральных геодезических наблюдений следует, что обоснованный выбор методов наблюдений позволяет:

- выявлять участки с наиболее активным развитием оползневого процесса;
- определять границы, мощности и объемы смещающихся масс;
- определять прогнозные значения основных параметров оползневого процесса при ожидаемых геометрических параметрах строения склона.

Таким образом, можно будет составлять локальные прогнозы, которые являются частью пространственно-временных прогнозов развития оползней. Принципиальная возможность временного прогнозирования оползневого процесса обусловлена закономерным развитием его во времени, что достигается только благодаря правильному выбору оптимального проекта наблюдательной геодезической сети с учетом геологического строения склонов и соответствующей методики наблюдений.

1.5. Методы геометризации геологических процессов

Теоретические и практические приемы геометризации форм и условий залегания пород разработаны известными учеными: П.А. Рыжовым, В.А. Букринским, А.И. Осецким, Е.А. Несмашным, Е.П. Татарановичем, В.А. Гордеевым [69, 70, 71, 72, 73, 74, 75] и др. Сущность метода геометризации основана на применении изолиний для количественного и качественного анализа изменчивости показателей.

А.И. Осецкий разработал метод геометризации месторождений полезных ископаемых на основе циклографических проекций [71]. Методы геометризации форм рудной залежи и элементов тектонической расчлененности на участках слоевой выемки в масштабах, а также и графоаналитический метод геометризации залежей при проектировании открытых разработок на основе цифровых моделей рассмотрены в работах [73]. Теоретическое обобщение геометризации горно-технологических и геомеханических условий открытой разработки месторождений полезных ископаемых, обеспечивающее горное производство достоверными оценками и прогнозами состояния геологической среды на карьерах сделано В.А. Гордеевым [74, 75].

Методы геометризации топографических поверхностей оползневых склонов, которые позволяют их вычитать и складывать, приведены в работах [57, 65]. Сложив поверхности топографического порядка, можно определить суммарный объем нескольких слоев пород или объем всего оползневого склона для выбора мест проектирования противооползневых сооружений.

Указанные выше методы геометризации не устанавливают взаимосвязь между смещениями и их скоростью, полученными на основании геодинамических наблюдений и с учетом инженерно-геологического строения склона.

Исследования, выполненные в области геометризации, относятся к геотехническим условиям разработки месторождений; методы геометризации оползневых процессов во взаимосвязи с геометрическими параметрами строения склонов

и прогноз устойчивости склонов, разработанные на их основе, отсутствуют. Взаимосвязь кинематических характеристик оползневых смещений и инженерно-геологических элементов строения склонов, представленная методом геометризации в изолиниях, позволяет спрогнозировать образование оползневых процессов на локальной территории.

Таким образом, анализ основных методов оценки устойчивости склонов, натурных инструментальных наблюдений и методов геометризации геологических процессов показал, что оползневые явления зависят от многих факторов, которые могут оказывать решающее влияние в том или ином месте, что требует их регионального изучения.

Структура логических связей исследований для обоснования параметров оползневых процессов на основе форм залегания пород приведена на рис. 1.3.



Рис. 1.3. Структурная схема изучения оползневых процессов

2. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА УСТОЙЧИВОСТЬЮ ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ

2.1 Анализ оползней на склонах балок г. Днепропетровска

Наиболее характерными участками проявления оползней в Днепропетровске являются застроенные склоны балок и оврагов, большинство которых находится в центральной части города. Среди них наиболее крупные – это балки Аптекарская, Встречная, Диёвская, Евпаторийская, Запорожская, Красноповстанческая, Сухой овраг, Тоннельная и др. протяженностью более 4 км каждая. Они отличаются большой разветвленностью, образуют холмистый рельеф и представляют собой естественный дренаж. Верховья балок выходят за пределы территории города, устья сливаются с долиной р. Днепр.

Интенсивность оползневых процессов правобережной части города Днепропетровска обусловлена, с одной стороны, особенностями геологического строения территории, с другой – техногенным воздействием, связанным в первую очередь с общим поднятием уровня подземных вод. Усиленный рост промышленного и градостроительного освоения территории города увеличивает техногенную нагрузку на единицу площади города.

В морфологическом отношении здесь выделяются: водораздельное плато, склоны водораздельного плато и балок, сочетание высоких и низких приречных террас р. Днепр.

Сложены плато и его склоны высокопористыми лессовыми грунтами значительной мощности, нередко до 20 – 50 м. Начиная с глубины залегания Завадовских слоев (20 – 25 м), в разрезе лессовой грунтовой толщи преобладают тяжелые суглинки, переходящие в глины.

Одна из особенностей инженерно-геологических свойств, характеризующих суглинки, – подверженность их просадкам при замачивании и увеличении нагрузки. При значительном замачивании суглинки способны к катастрофической потере прочности. Поэтому большинство оползней Днепропетровска образовалось вследствие переувлажнения склона. На многих участках склонов протекают разрушительные оползневые процессы. Здесь выделяются различные типы оползневых нарушений, отличающихся друг от друга по своему механизму, динамике и масштабам проявления.

Начиная с 1976 г. на территории города за последние десятилетия, зафиксировано более 30 крупных оползней и оползневых смещений, которые отличаются своими формами, размерами и характером проявления. Значительно участились просадки и деформации зданий и сооружений почти по всей территории города. Используя материалы отчетов инженерно-геологических исследований Новоомсковской КРГЭ “Укрюжгеология”, “УкрвостокГИИНТИЗ” и “ДнепрокоммунНИИпроект” в данном подразделе дана характеристика склоновым процессам, которые имели место за период 1976 – 2012 гг.

В плане оползни имеют весьма разнообразные формы очертания. Наиболее часто встречается циркообразная – главный и внутренний уступы полукругом окаймляют понижение, образуя амфитеатр (рис. 2.1, а). Длина вдоль склона от края до

края L (по фронту) примерно равна его ширине B . У фронтальных оползней главные и внутренние уступы вытянуты вдоль склона на значительные расстояния – $L \gg B$ (рис. 2.1, б). Оползни-потоки глетчерообразно вытянуты вдоль понижений (ложбин стока), спускающихся со склона – $L \ll B$ (рис. 1.2, в).

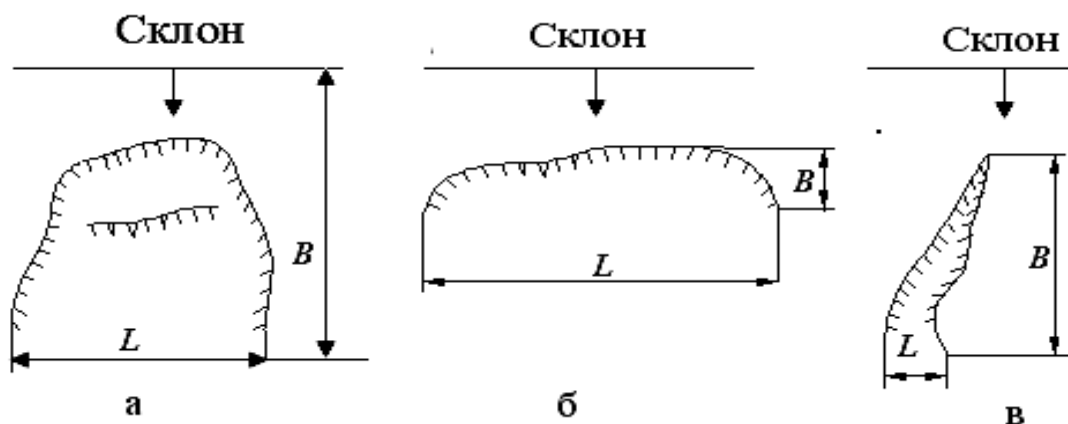


Рис. 2.1. Формы очертаний оползней в плане: циркообразная (а), фронтальная (б), глетчерообразная (в)

Оползни Днепропетровска весьма разнообразны по размерам (от 5 – 10 до 500 – 600 м) и форме. На склонах крутизной 5 – 15 ° образуются преимущественно оползни-обвалы глетчерообразной формы, при крутизне более 15 ° – циркообразные, фронтальные и оползни угловатых очертаний.

Глубокие оползни приурочены к крупным эрозионным системам (балки Красноповстанческая, Сухой Овраг, урочище Козерево, балка Белая) и составляют 60 % от всех оползней. Это оползни фронтального типа протяженностью вдоль склона от 120 до 520 м (балка Белая) и глубиной распространения около 20 – 30 м (балки Красноповстанческая, Тоннельная). Многие оползни старые, стабилизировавшиеся, в виде сложного бесформенного задернованного тела со следами двух-трёх смещений, осложненных более мелкими оползнями и растущими оврагами. Среди глубоких выделяются оползни циркообразной формы (балка Сухой Овраг – 200 – 250 м; ж / м Тополь – 1) с глубиной деформации от 10 до 20 м.

К глубоким оползням отнесены также оползни **угловых очертаний**, протяженностью от 10 до 300 м, которые гораздо меньше, чем фронтальные и циркообразные. Характеризуются данные оползни тем, что они образуются на обнаженных склонах балок и оврагов с крутизной 80 – 90 ° и находятся в состоянии предельного равновесия.

Причинами образования большинства оползней, нарушивших равновесие склонов в балках Природной, Белой, Семергейка, урочище Козерево, были природные факторы, в балках Войцеховича, Аптекаарской, Сухой Овраг, Красноповстанческой, Евпаторийской и Встречной – техногенные.

В регионе города среди развитых оползней **первого порядка** наиболее распространены нормальные (истинные) оползни **первой группы** [26].

Первый класс первой группы нормальных оползней – это **глубокие**, как правило, крупные по размерам, отличающиеся сложной структурой, отчетливо вы-

раженной поверхностью или зоной смещения циркообразной и фронтальной форм. Все они по типу относятся к оползням в однородной и изотропной среде, какой являются лессовидные суглинки, и прикреплены к первой группе. Характерным примером глубоких оползней явились оползни на левом склоне балок Красноповстанческая, Встречная, а также ж/м Тополь–1 и балки Войцеховича.

Второй класс первой группы – это **поверхностные оползни**, которые представляют оползни небольших размеров, характеризующиеся тем, что основной деформированный горизонт захватывает часть склона, не достигая его основания. Развиваются они на склонах крутизной $5 - 15^\circ$, редко 55° . Глубина деформаций склонов не превышает $1 - 3$ м. Это оползни простой формы и осложненные несколькими ступенями оползневых деформаций – циркообразных угловых очертаний, глетчeroобразные оплывины [38]. Возникновение оползней-обвалов (оплывины), относящихся ко второму классу поверхностных оползней, чаще всего объясняется полной и частичной потерей первичной структуры лессовидных суглинков вследствие повышения их влажности. Оплывины имеют самую разнообразную в плане форму – эллипсоидную, грушевидную, ложкообразную, глетчeroобразную. На склонах многих балок и оврагов интенсивно развиваются оползни-обвалы. Обвально-обрывистые участки приурочены к склонам с крутизной свыше 55° – это чаще всего склоны донных оврагов и ранее подработанные склоны балок Аптекарская, Красноповстанческая, Рыбальской, Войцеховича и др.

Вторая группа оползней первого порядка объединяет в себе особенные оползни (псевдооползни) – оседание рыхлых, недоуплотненных грунтов, насыпей и отвалов. Такой тип оползневых смещений возникают в результате инженерно-хозяйственной деятельности человека. Например, оползень в балке Аптекарская и в овраге по улице Дальней. Оползень по улице Угловой в 1976 г. произошел в техногенных грунтах, мощность которых превышала 10 м. Насыщение их водой привело к нарушению устойчивости склона. В связи с нарастающим подъемом уровня грунтовых вод, освоением новых участков города без должного изучения инженерно-геологических особенностей развитие оползневых процессов продолжается. К тому же на склонах многих балок и оврагов интенсивно развиваются оползни-обвалы. Обвально-обрывистые участки приурочены к склонам с крутизной свыше 55° – это чаще всего склоны донных оврагов и ранее подработанные склоны балок Аптекарской, Красноповстанческой, Рыбальской, Войцеховича. Прошедшие оползни на естественных склонах балок г. Днепропетровска приведены в табл. 2.1. Развитие большинства таких оползней находится в закономерной связи с **природными** и **техногенными** факторами образования.




Природные факторы образования оползней: крутизна, конфигурация склона и степень расчлененности его оврагами; условия залегания горных пород и их литологический состав; наличие водоносных горизонтов, которые оказывают влияние на обводнение пород; эрозия пород в нижней части склонов; переменное увлажнение и высыхание пород; разупрочнение в процессе их выветривания и последующего обводнения атмосферными осадками.

Основными техногенными факторами являются: подрезка склонов карьерами; перегрузка их отвалами и сооружениями; обводнение пород склона водами из

водокоммуникационных систем; уничтожение древесной и кустарной растительности; неупорядоченная распашка земли на склонах; засыпка балок бытовым и строительным мусором; создание динамических нагрузок и колебательных движений от механизмов, вызывающих вибрацию и т.д.

Таблица 2.1

Оползни, происшедшие на склонах балок г. Днепропетровска

Общий вид оползня	Данные, характеризующие происшедший оползень	Основные факторы образования
1	2	3
<p data-bbox="293 568 558 600">Балка Аптекарская</p> 	<p data-bbox="727 568 1094 786">Улица Угловая; 7 июня 1976 г. Тип оползня – глубокий, по характеру – Оползень-обвал, циркообразной формы</p>	<p data-bbox="1120 568 1441 819">Подрезка склона карьером, перегрузка хозяйственно-бытовыми отвалами и насыщение их водой, резкий подъем уровня грунтовых вод</p>
<p data-bbox="233 1061 619 1093">Балка Красноповстанческая</p> 	<p data-bbox="727 1061 1094 1240">Улица Сирко; 22 октября 1983 г. Тип – выдавливание с последующим проседанием, глетчерообразной формы</p>	<p data-bbox="1120 1061 1441 1312">Изменение влажности грунтов вследствие поднятия уровня грунтовых вод, связанных с хозяйственной деятельностью человека</p>
<p data-bbox="271 1538 564 1570">Балка Евпаторийская</p> 	<p data-bbox="727 1538 1094 1756">Жилой массив Сокол-2. Оползневые подвижки 1982 – 1983 гг. Тип – поверхностные смещения. Оползень структурный</p>	<p data-bbox="1120 1538 1441 1789">Нагрузка склона балки Евпаторийской многоэтажной застройкой, подъем грунтовых вод за счет утечек из водонесущих коммуникаций</p>

1	2	3
<p>Балка Встречная</p> 	<p>Жилой массив Тополь-1; 6 июня 1997 г. Тип оползня – глубокий, по характеру – пластиче- ский, циркообразной формы</p>	<p>Суффозия водонеус- тойчивых лессовых отложений в средней части склона, вызван- ная гидродинамиче- ским давлением в на- правлении тальвега балки при утечке из канализационного коллектора</p>
<p>Балка Красноповстанческая</p> 	<p>Улица Сирко, 132, 139; 29 декабря 1997 г. Тип оползня – глубо- кий, по характеру – оползень-обвал фрон- тальной формы</p>	<p>Переувлажнение скло- на и нарушение проч- ностных характеристик пород</p>
<p>Балка Войцеховича</p> 	<p>Кировский район; 2 ноября 2011 г. Тип оползня – глубо- кий, по характеру – оползень-обвал фрон- тальной формы</p>	<p>В результате смещения земляной массы было засыпано 28 гаражей и мебельный склад, уничтожен подземный водопровод</p>

Оползни глубокие, крупные по размерам, сложной структуры, с отчетливой поверхностью скольжения образуются на обнаженных склонах балок и оврагов с крутизной $80 - 90^{\circ}$ в однородной изотропной среде. Оползни покровных отложений небольшие по размерам развиваются в основном на склонах крутизной $5 - 15^{\circ}$ редко до 55° .

На основании схемы распределения оползней Е. П. Емельяновой и указанных выше характеристик оползневых процессов, образующихся на склонах балок и оврагов, выполнена классификация оползней г. Днепропетровска (рис. 2.2).



Рис. 2.2. Классификация оползней на территории г. Днепропетровска

2.2. Инженерно-геологические и гидрогеологические характеристики оползневых склонов

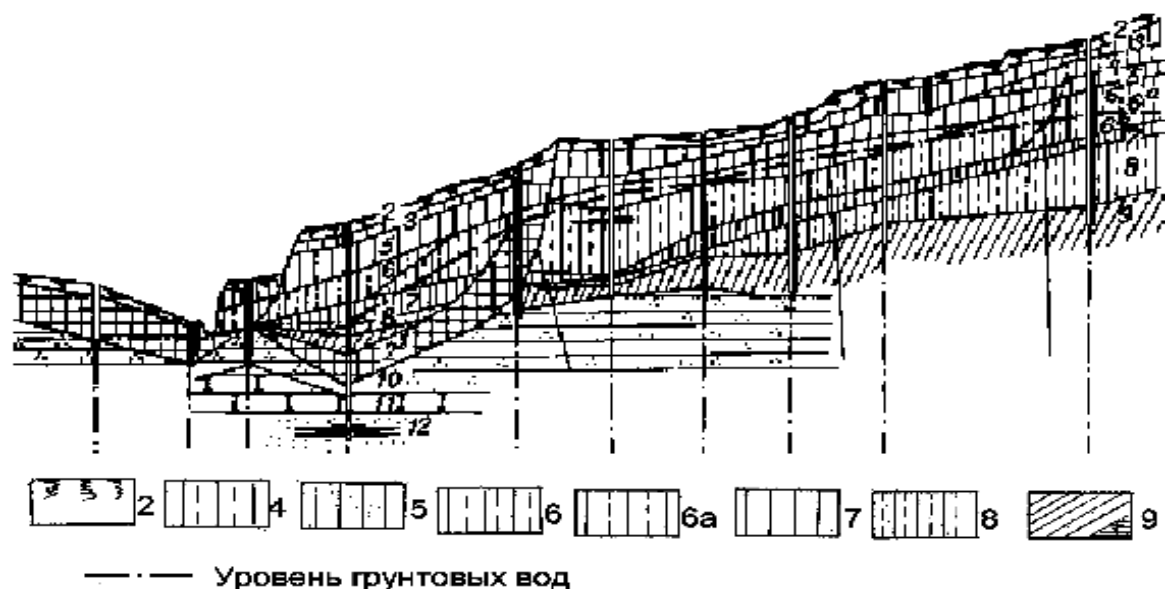
При изучении механизма и кинематики оползневого процесса особо важно знать геологическую структуру оползневого склона. Город Днепропетровск расположен в неоднородном по своему геологическому строению районе. В геологическом строении его территории принимают участие кристаллические породы докембрия и отложения осадочного комплекса палеозойской, мезозойской и кайнозойской групп. В условиях города глубина развития экзогенных геологических процессов находится в прямой зависимости от геологического строения и геоморфологической расчлененности территории. Она захватывает верхнюю 10 – 20-метровую толщу четвертичных отложений, которые представляют эолово-делювиальные, аллювиальные и аллювиально-делювиальные, делювиальные и техногенные комплексы. Приведенные ниже данные получены по результатам изысканий “УкрвостокГИИНТИЗа” [26].

В геологическом строении склонов балки Аптекарской принимает участие комплекс осадочных отложений **неогена и антропогена**. Из неогенового комплекса пород имеют распространение лишь отложения Сарматской свиты (N_1S_{n1}), представленные известняками и глинами. Максимальная вскрытая мощность этих отложений – 6 – 7 м, а полная мощность их вскрыта не была [2].

Оползневой склон балки Красноповстанческой в геологическом строении представляет собой **палеозойско-кайнозойскую кору выветривания гранитов (Pz-Kz)**. Кора сложена дресвой и щебнем гранита, залегающими в тальвеге балки, и каолинами – в верхней части балки.

Неогеновые отложения сложены песками серовато-желтыми с мелкими прослоями пылеватых и глинистых песков. Четвертичные отложения представлены современными, верхне-, средне- и нижнечетвертичными лёссовидными породами, подстилаемыми нерасчлененными плаценово-нижне-четвертичными глинами.

Геологический разрез склона балки Евпаторийской представлен эолово-делювиальными лёссовыми отложениями антропогенного комплекса. Он состоит из лёссов и лёссовых суглинков, перекрытых с поверхности насыпными и почвенно-растительными грунтами, а тальвег балки – верхне- и средне-**антропогеновые отложения**, размытые до лёссов Днепровского горизонта, перекрытые балочным делювием. Подлежащий изучению северный склон балки участка “Сокол” сложен лёссовидными породами с прослойками глины, для которых характерна весьма высокая степень пластичности и сжатия при замачивании (рис. 2.3).



2 – почвенно-растительный суглинок; 4 – лёсс желтый макропористый, твердой консистенции; 5 – суглинок лёссовый, буровато-желтый, макропористый, жесткой консистенции; 6 – суглинок лёссовый буровато-желтый, пластичной консистенции; 6 a – лёсс палево-желтый, макропористый; 7 – суглинок лёссовый макропористый; 8 – лёсс светло-желтый пластичный; 9 – суглинок красно-бурый, слабо макропористый, твердой консистенции

Рис. 2.3. Схема геологического разреза оползневой балки

Геологическое строение ж/м Тополь-1 представляют **лѣссовые эолово-делювиальные** отложения среднечетвертичного возраста, перекрытые сверху почвенно-растительным слоем познечетвертичного возраста. Склон балки Встречной представлен чередованием лѣссовых суглинков и супесей различной мощности, выдержанных по простиранию, с пологим уклоном и частичным выклиниванием суглинков буровато-желтых и лѣсса светло-желтого на склоне балки. На глубине 15 – 25 м лѣссовые грунты подстилаются плотными красно-бурыми суглинками с углом падения кровли 5 – 15⁰.

Из геологического строения склонов балок следует, что лѣссы, слагающие склоны Днепровского региона, отличаются по своему составу и свойствам своей пористостью и характерной способностью к резкому уплотнению при замачивании водой (табл. 2.2). Сжимаемость лѣссовых пород вызывает значительную осадку зданий и сооружений. Многие жилые дома в центральной части города деформируются с образованием трещин, перекосов и проседания.

В гидрологическом отношении у правобережной части города в пределах Украинского кристаллического массива условия для накопления подземных вод неблагоприятны. Здесь единственным водоносным горизонтом является зона трещиноватых кристаллических пород, однако практического значения для централизованного водоснабжения она не имеет.

Склон балки Аптекарской, где произошел один из первых крупный оползень, характеризуется наличием водоносного горизонта, приуроченного к лѣссовой толще и насыпным грунтам антропогена. Его мощность колеблется от 1,5 – 2,0 до 17,0 м. Наибольшая мощность приурочена к верхней бровке склона, т. е. к местам наибольшего распространения лѣссов и насыпных грунтов.

Водоупорный слой повсеместно для этого горизонта образуют красно-бурые суглинки, залегающие на элювии известняка. Глубина залегания “зеркала” грунтовых вод различна и изменяется в широких пределах от 0,0 в зоне выклинивания до 12,0 м в верхней части склона балки. Питание водоносный горизонт получает за счет инфильтрации атмосферных осадков и поливных вод, всевозможных утечек из сетей водопроводно-канализационного хозяйства. Дреной для грунтового потока является Аптекарская балка.

На склоне балки Красноповстанческой оползневого участка “Сирко” присутствует три основных водоносных горизонта: аллювиально-делювиальные отложения четвертичного возраста; эолово-делювиальные нижне-среднечетвертичные отложения; полтавские отложения.

Первый водоносный горизонт приурочен к тальвегу балки. Водоупорным слоем служат каолины первичные белого и светло-серого цветов, глубина залегания которых 3,5 – 11,2 м. Грунтовые воды вскрыты на глубине 0,35 – 2,2 м. Питание водоносного горизонта осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков и разгрузки фильтрационного потока со стороны водораздельного плато. Подъем вод достигает 1 – 5 м, при этом наблюдается увлажнение склона балки.

Второй водоносный горизонт распространен в пределах водораздельного плато и его склонов, отсутствует лишь в районе, где горизонт дренирован. Водо-вмещающими породами являются лѣссовидные супеси и суглинки. Водоупорным

слоем служат нижнечетвертичные, красно-бурые, плотные суглинки Мартоношского горизонта и красно-бурые глины плиоценово-нижнечетвертичного возраста. Глубина залегания водоупорного слоя 21,0 – 37,0 м. Мощность водоносного горизонта изменяется от 11,0 до 21,5 м.

Глубина залегания уровня грунтовых вод находится в пределах от 9,4 до 17,58 м. Питание горизонта осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, утечек из водонесущих коммуникаций и инфильтрации хозяйственно-бытовых вод из поглощающих колодцев. Конфигурация фильтрационного потока зависит от условий питания и разгрузки.

Третий водоносный горизонт отложений Полтавской свиты неогена имеет повсеместное распространение в пределах исследуемой территории. В районе переулка Биологического и улицы Сирко данный водоносный горизонт от поверхности первый. Водосодержащими породами являются пески мягкие, желтоватого цвета, слабоглинистые. Глубина залегания горизонта 27,6 – 38,7 м на абсолютных отметках 78,5 – 87,12 м. Питание Полтавского водоносного горизонта осуществляется из вышележащих водоносных горизонтов. Разгрузка его происходит в балку Красноповстанческую и ее отвершок. За счет глубокого вреза отвершка балки полтавский водоносный горизонт дренированный, и грунтовые воды перетекают в верхнечетвертичные отложения. Уклоны грунтового потока изменяются в пределах 0,025 – 0,068 и 0,10 – 0,25. На период 1968 – 1972 гг. уровень грунтовых вод в пределах исследуемой территории находился на высоте 23,7 – 25,5 м. После ввода в эксплуатацию жилых многоэтажных зданий в 1972 – 1984 гг. общий подъём грунтовых вод составил 10,5 – 13,0 м при среднегодовой интенсивности подъёма порядка 0,85 – 1,1 м.

На склоне балки Евпаторийской оползневого участка “Сокол” на глубине 30 м встречается один безнапорный водоносный горизонт, приуроченный в районе оврага к лёссам Днепровского и Сульского горизонтов, а на оползневом склоне балки – к лёссовым суглинкам Бугского горизонта. Водоупорным слоем являются красно-бурые, тяжелые суглинки Мартоношского горизонта, кровля которых залегает в районе оврага на глубине 22,7 – 29,6 м, а на оползневом склоне балки – 11,8 – 12,0 м. Глубина залегания грунтовых вод обуславливается рельефом местности. В период изысканий в 1981 – 1984 гг.

“УкрвостокГИИНТИЗом” было зафиксировано положение уровня грунтовых вод на глубине 21,6 – 12,6 м, и 4,4 – 4,5 м в районе оползневого склона (табл. 2.3). В тальвеге оврага и балки происходит выклинивание частичных грунтовых вод. Направление грунтового потока – на юго-восток, в сторону р. Днепр и древней балки. Питание водоносного горизонта осуществляется в основном за счет инфильтрации атмосферных осадков и частично за счет утечек из водопроводных коммуникаций в районе застроенной территории. Дренируется водоносный горизонт долиной р. Днепр и в меньшей степени балкой и оврагом. В настоящее время тальвег балки заболочен с образовавшимся прудом.

Таблица 2.2

Физико-механические свойства грунтов

Стратиграфические слои	Гранулометрический состав, % фракций			Влаж- ность, д. ед.	Объ- емный вес, г/см ³	Объем- ный вес скелета, г/см ³	Удель- ный вес, г/см ³	Порис- тость, %	Коэффициент пористости, д. ед.	Коэффициент насыщения, д. ед.	Гра- ница теку- чести, д. ед.
	песча- ных	пыли	глины 0,005								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Причерноморские											
Суглинок средний	23,10	50,14	23,76	0,17	2,03	0,73	2,71	35	0,572	0,86	0,33
Дофиновские											
Суглинок легкий	25,33	57,68	17,07	0,13	1,87	0,66	2,67	37	0,623	0,56	0,27
Суглинок средний	23,	46,80	24,20	0,16	2,05	0,77	2,68	34	0,500	0,83	0,31
Бугские											
Суглинок легкий	34,27	49,24	16,49	0,08	1,97	1,80	2,67	33	0,476	0,45	0,28
Суглинок средний	18,83	56,98	24,19	0,10	1,98	1,80	2,67	33	0,480	0,54	0,29
Витачевские											
Суглинок средний	20,07	54,34	25,59	0,12	1,83	1,63	2,68	38	0,640	0,51	0,32
Прилуцкие											
Суглинок средний	19,12	57,41	23,29	0,23	1,79	1,45	2,71	43	0,842	0,71	0,31
Кайлацкие											
Суглинок средний	33,38	42,84	23,76	0,23	1,91	1,56	2,64	41	0,699	0,88	0,32
Суглинок тяжелый	11,26	56,0	32,63	0,18	2,01	1,72	2,70	36	0,578	0,94	0,36
Днепровские											
Суглинок легкий	17,71	62,03	20,26	0,12	2,06	1,85	2,65	31	0,435	0,74	0,26
Завадовские											
Суглинок средний	25,81	40,90	33,29	0,15	1,99	1,73	2,69	36	0,556	0,72	0,33
Суглинок средний	12,28	51,32	36,40	0,12	1,79	1,60	2,66	40	0,663	0,48	0,35
Суглинок тяжелый	9,64	45,22	42,14	0,09	2,05	1,88	2,68	30	0,426	0,57	0,42
Лубенские											
Суглинок тяжелый	6,21	45,11	48,68	0,19	1,99	1,67	2,67	37	0,599	0,85	0,42
Мартоношские											
Глина	9,32	49,53	41,15	0,16	2,03	1,77	2,71	35	0,531	0,82	0,41

Стратиграфические слои Литологические разности	Граница раскатыва- ния	Граница пластич- ности	Пока- затель консис- тенции	Полная влажност- ность	Молеку- лярная влажност- ность	Водоот- дача	Относи- тельное набуха- ние, %	Угол внут- реннего трения, град	Сцепле- ние, МПА	Относи- тельная просодо- чность
1	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Причерноморские Суглинок средний	0,2	0,14	0	0,21	0,15	0,06	0,9	21	0,075	0,016
Дофиновские Суглинок легкий Суглинок средний	0,18 0,17	0,08 0,12	0 0	0,22 0,19	0,12 0,15	0,10 0,05	4,0 62,1	51 30	0,045 0,045	0,016 0,009
Бугские Суглинок легкий Суглинок средний	0,18 0,17	0,10 0,12	0 0	0,19 0,18	0,15 0,14	0,04 0,04	16,3 -	25 -	0,08 -	0,030 0,016
Витачевские Суглинок средний	0,19	0,13	0	0,24	0,13	0,08	8,0	-	-	0,008
Прилуцкие Суглинок средний	0,19	0,12	0,33	0,32	0,15	0,07	9,6	25	0,030	0,002
Кайлакские Суглинок средний Суглинок тяжелый	0,19 0,19	0,13, 0,17	0,25 0	0,24 0,21	0,13 0,15	0,11 0,06	1,3 15,0	21 24	0,025 0,101	0,005 0,004
Днепровские слои Суглинок легкий	0,17	0,09	0	0,17	0,04	0,02	18,2	-	-	0,019
Завадовские Суглинок средний Суглинок тяжелый Суглинок легкий	0,17 0,17 0,22	0,16 0,18 0,20	0 0 0	0,21 0,25 0,16	0,13 0,15 0,18	0,08 0,10 -	9,6 7,2 -	21 -	0,047 0,080 -	0,008 0,000 -
Лубенские Суглинок тяжелый	0,25	0,19	0	0,22	0,19	0,03	5,3	10	0,03	-
Мартоношские Глина	0,21	0,20	0	0,20	0,18	0,02	12,9	17	0,1773	0,000

Таблица 2.3

Гидрогеологические условия оползневых склонов балок

Склоны балок	Название горизонтов	Тип и характер водоупорного слоя	Область питания	Область разгрузки	Область распространения и вододержащие породы	Коэффициент фильтрации, м/сут	Абсолютные отметки кровли водоупорного слоя, м
Красноповстанческая, оползневой участок "Сирко"	I. Аллювиальные делювиальные отложения четвертичного возраста	Каолиновые белые и светло-сероцветов; глубина залегания 3,5–11,2 м	Инфильтрация атмосферных осадков и разгрузка фильтрационного потока	Красноповстанческая балка и отвшок балки	Тальвег балки. Супеси лессовидные светло-желтого и буровато-желтого цветов	0,4	62,54 – 75,34
	II. Эолово-делювиальные – нижние среднететвертичные отложения	Красно-бурые плотные суглинки Мартоношского горизонта и красно-бурые глины; глубина залегания 21,0 м	Инфильтрация атмосферных осадков, утечка из водонесущих коммуникаций		Лессовидные супеси и суглинки	0,03	93,0 – 105,8
Евпаторийская, оползневой участок "Сокол"	III. Отложения полтавской свиты		За счет перетока воды из вышележащих водоносных горизонтов	Река Днепр, частично балка и овраг	Повсеместное. Пески мелкие желтого цвета, слабоглинистые	0,009	
	Безнапорный один водоносный горизонт	Красно-бурые желтые суглинки	За счет инфильтрации атмосферных осадков и утечек из водонесущих коммуникаций		Лессовые грунты	0,04	113,8 – 116,40

2.3. Особенности построения специальных опорных сетей наблюдательных станций на оползневых участках “Сокол” и “Сирко”

Пространственное положение опорных и подверженных смещениям пунктов на двух оползневых участках устанавливается геодезическими наблюдениями. Учитывая особенности инженерно-геологических и гидрогеологических условий склонов, были разработаны рациональные типы схем наблюдательных станций, конструкции знаков и их закрепление на оползневых участках, а также выбраны методы и периодичность наблюдений, методика математической обработки результатов измерений.

Исследования оползневых процессов проводились на участках ж/м “Сокол” (далее – участок “Сокол”) – естественный склон балки Евпаторийской, где активизировались оползневые смещения, и улицы “Сирко” (далее – участок “Сирко”) – склон балки Красноповстанческая, на котором произошел оползень-обвал.

Основная задача исследований на участке “Сокол” заключалась в наблюдении за развитием оползневых смещений с целью установления и прогноза области их распространения, а на участке “Сирко” – выявлении на земной поверхности потенциально опасных участков, где подобные обрушения наиболее вероятны. Различие оползневых процессов, а также задач исследований определило выбор схем наблюдательных станций, методике и точности наблюдений.

В результате исследований, проведенных в балках Евпаторийской и Красноповстанческой, замечена отличительная особенность: на участке “Сокол” оползневые процессы развиваются медленно, смещение сползающих масс происходит по пологопадающей поверхности скольжения со скоростью несколько сантиметров в год, а на участке “Сирко” – внезапно, в виде обрушения с образованием вертикальных стенок отрыва.

Первым из двух участков, где производились работы, был участок “Сирко”. Основанием для наблюдений послужил оползень, который произошел 22 октября 1983 года на правом склоне балки Красноповстанческой, прилегающем к улице Сирко, и имел катастрофический характер. Одним из основных факторов развития такого рода оползней является уровень грунтовых вод, способствующих увеличению скорости фильтрации и суффозии частиц в песчано-глинистых породах. При этом в толще на некоторой глубине образуется ослабленная обводненная полость, которая после достижения критического состояния обрушается [15]. Важно заметить, что на момент начала работ за пределами оползней части склона никаких явно выраженных признаков развития оползневых явлений замечено не было.

Наблюдательная станция на участке “Сирко” состоит из двух видов оползневых пунктов: полигонометрии, расположенных в верхней части правого склона балки Красноповстанческой вдоль улиц и переулков, грунтовых марок, заложенных на правом, густо застроенном склоне балки по профильным линиям (рис. 2.4, а).

При закладке наблюдательной станции предполагалось, что пункты, расположенные за бровкой балки, не будут затронуты оползневыми процессами, они

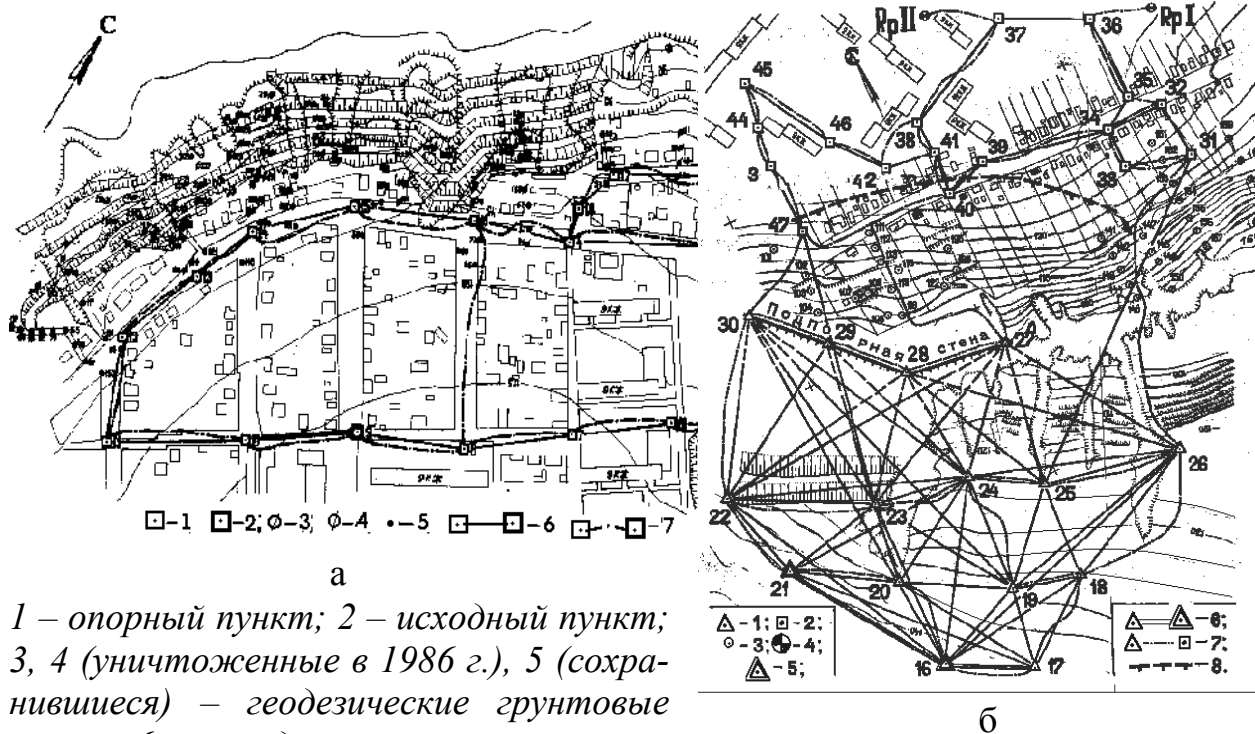
были приняты за опорные (стабильные) и относительно их определялись смещения. Всего на участке “Сирко” было заложено 123 пункта, из них опорных – 19; грунтовых марок – 104, выполнено 17 циклов геодезических наблюдений.

К маркам по профильным линиям в верхней части штанги приварена полусфера с начерченным центром. Это создает удобство при измерении расстояний между марками и превышений геометрическим нивелированием.

Вторым участком проведения работ был участок “Сокол”, расположенный на склоне балки Евпаторийской вблизи ж/м Сокол (рис. 2.4, б). Необходимость проведения наблюдений была вызвана тем, что в районе улицы Евпаторийской на северном склоне балки в связи с введением в эксплуатацию жилого массива Сокол-2 активизировались оползневые смещения.

На оползневом склоне расположены частные дома по улице Евпаторийской, а на водоразделе – жилые многоэтажные дома ж/м Сокол-2. Южный склон на момент заложения наблюдательной станции был незастроенным, большая часть его занята огородами, частично залесённая и изрезанная оврагами.

В соответствии с геологическим строением и с учетом рельефа естественного склона была заложена наблюдательная станция, которая расположена на юго-востоке ж/м “Сокол-2” в районе улицы Евпаторийской на обоих склонах балки Евпаторийской.



1 – опорный пункт; 2 – исходный пункт; 3, 4 (уничтоженные в 1986 г.), 5 (сохранившиеся) – геодезические грунтовые марки; 6 – исходная сторона полигонометрической сети; 7 – полигонометрический и нивелирный ходы

1 – пункт микротриангуляции; 2 – пункт полигонометрии; 3 – оползневая грунтовая марка; 4 – грунтовой репер; 5 – исходный пункт плановой сети; 6 – базисная сторона; 7 – нивелирный ход; 8 – граница оползня

Рис. 2.4. Схемы наблюдательных станций участков “Сирко” (а) и “Сокол” (б)

В структурном отношении наблюдательная станция состоит из сплошной сети микротриангуляции, полигонометрической сети и грунтовых оползневых марок. Характерной особенностью станции является густая сеть опорных пунктов на обоих склонах балки. Всего на участке “Сокол” заложено 32 опорных и 47 оползневых грунтовых марок; выполнено 17 циклов наблюдений с периодом шесть месяцев весной и осенью, а с 1996 по 2001 г. – с периодом один год (весна). Станция покрывает всю площадь северного склона, затронутого оползневым процессом. Схема геодезической сети дает достаточно надежное определение пространственного положения каждого пункта станции с контролем.

Исходные пункты для изучения оползневого процесса располагаются на южном склоне балки. Особенность наблюдательной станции на участке “Сокол” состоит в том, что опорные пункты заложены в зоне влияния оползневых процессов – на подпорной стене. Это дает возможность определить ее устойчивость с высокой точностью.

Закрепление пунктов в грунте гарантирует их надежную длительную сохранность, предполагая, что часть из них находится в зоне влияния медленно развивающихся оползневых процессов. Исходя из этого, была разработана конструкция опорных пунктов. Конструкция, схема закладки пунктов микротриангуляции и все необходимые пояснения к ней приведены на рис. 2.5, а, и 2.6. Для устранения смещений пункта вследствие периодического промерзания и оттаивания его основания закладка пункта сделана на глубину 1,70 м на бетонную подушку высотой 0,5 м и залита цементом

Следует заметить, что конструкция и схема закладки пунктов полигонометрии практически не отличается от пунктов микротриангуляции. Различие состоит лишь в том, что на пунктах полигонометрии отсутствует бетонная тумба (рис. 2.5, б).

Главные конструктивные элементы наблюдательных опорных пунктов на обоих участках – верхняя площадка и репер. Площадка предназначена для установки на ней в процессе наблюдений геодезических измерительных приборов. Для этого в центре площадки просверлено отверстие, диаметр которого равен диаметру станковых винтов приборов, т. е. 16 мм, а в верхней части трубы непосредственно под площадкой, вырезано окно для закрепления на ней приборов.

Нивелирная марка приварена к трубе на высоте 15 – 20 см над поверхностью земли и предназначена для установки на ней нивелирной рейки. Таким образом, положение любого из опорных пунктов наблюдательной станции в плане определяется координатами X и Y центра отверстия в плоскости площадки, а по высоте – отметкой марки Н. Для предохранения площадки и отверстия от повреждений каждый пункт микротриангуляции и полигонометрии закрывается специальным колпаком с винтовым замком.

Грунтовые оползневые марки закладывались непосредственно на оползневом склоне для наблюдений за его смещением, которые проводились геодезическим методом. Конструкция грунтовой марки состоит из отрезка буровой штанги диаметром 52 мм и длиной 1,5 м с якорем внизу. Она забетонирована в

скважине диаметром 20 – 25 см на глубину 0,8 м. Над поверхностью земли выступает на высоту 0,5 – 0,7 м.

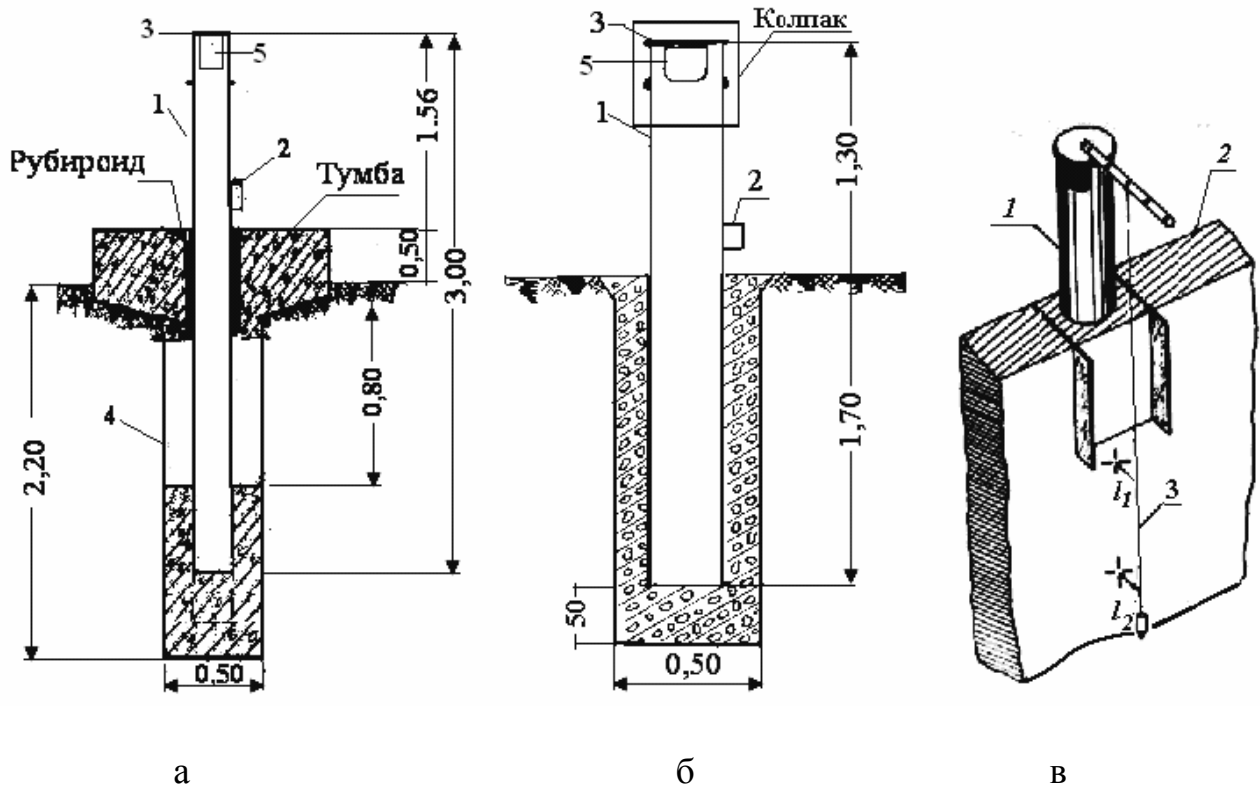


Рис. 2.5. Схемы конструкции и закладки наблюдательных пунктов: а – микротриангуляции: 1 – металлическая труба диаметром 168 или 219 мм; 2 – нивелирная марка; 3 – площадка для установки прибора; 4 – засыпка грунтом; 5 – окно для закрепления на ней приборов; б – полигонометрии; в – определения наклона подпорной стены: 1 – пункт микротриангуляции; 2 – подпорная стена; 3 – нитяный отвес: l_1 , l_2 – расстояние от подпорной стены до отвеса

Конструкция опорных пунктов наблюдательных станций разрабатывалась так, чтобы при угловых и линейных (светодальномерных) измерениях обеспечивалось центрирование измерительных геодезических приборов при установке их непосредственно на пункте.

Принимая во внимание назначение подпорной стены, особое значение уделялось результатам геодезических наблюдений для оценки ее устойчивости и эффективности. Кроме натуральных наблюдений за ее состоянием в плане и по высоте, были проведены специальные наблюдения за ее отвесным положением. Для этого на каждом с четырех пунктов на подпорной стене крепилась специальная линейка с вырезами, через которые пропускался нитяный отвес (см. рис. 2.5, в).

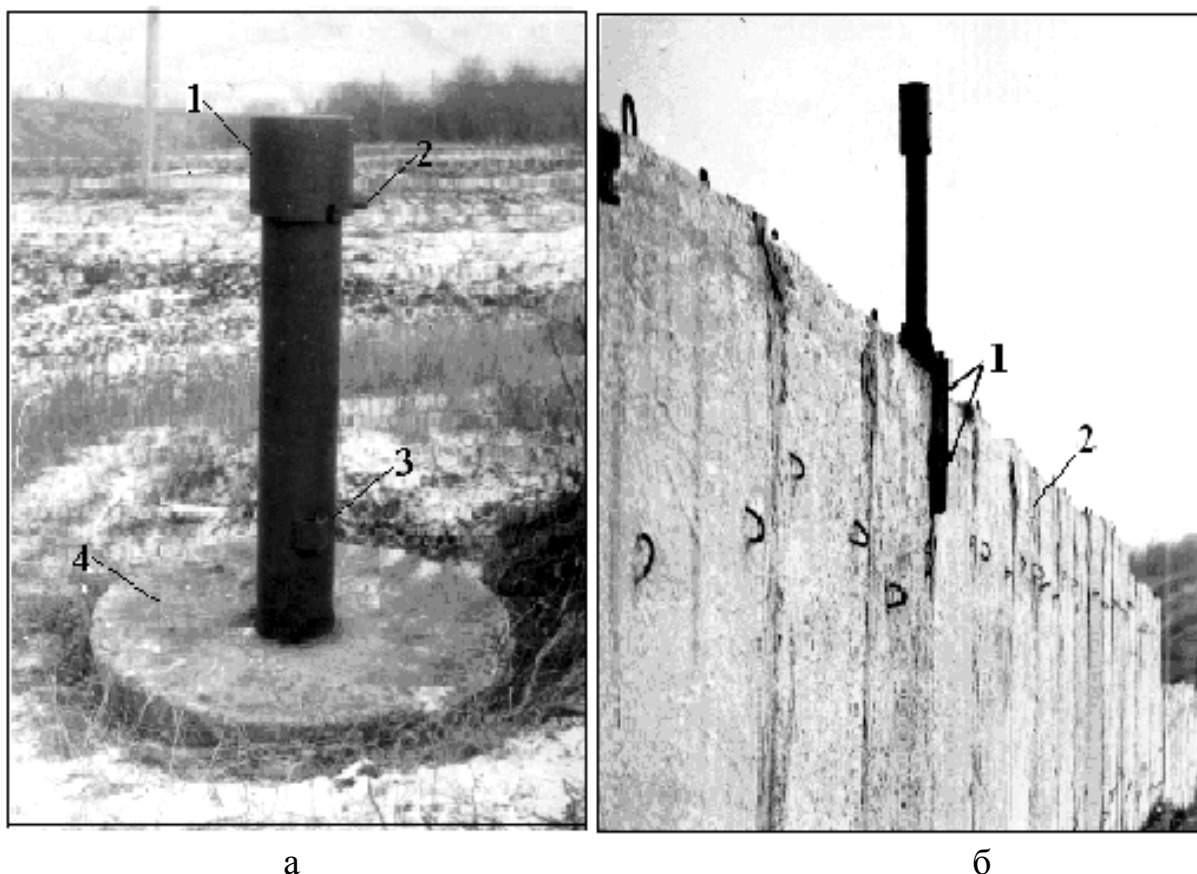


Рис. 2.6. Опорные пункты: а – общий вид пункта микротриангуляции: 1 – колпак с винтовым замком; 2 – винтовой замок; 3 – нивелирная марка; 4 – бетонная тумба; б – крепления пункта на подпорной стене: 1 – сквозные шпильки на двутавровой балке № 20; 3 – подпорная стена

2.4. Методы наблюдений сетей наблюдательных станций. Точность измерений и результатов уравнивания

Поскольку задачей геодезических работ на участках “Сокол” и “Сирко” являлось периодическое получение величин смещений точек, расположенных на естественных оползневых склонах и на противооползневых сооружениях, то основное направление исследований заключалось в определении с высокой точностью положения закрепленных пунктов и оползневых марок на участках.

Для этого использовались геодезические методы, позволяющие, в зависимости от местоположения объекта наблюдений, условий и используемых приборов, получить высокоточные результаты.

Плановое положение пунктов микротриангуляции, а также пунктов, расположенных на подпорной стене, определялось методом триангуляции, полигонометрических пунктов, расположенных на застроенной территории участков, – методом прокладывания полигонометрических ходов повышенной точности. Положение грунтовых марок по профильным линиям на участках “Сокол” и “Сирко” устанавливалось методами полярных координат и расстояний,

геодезическими засечками и их комбинациями в зависимости от рельефа местности и условий видимости.

Высотное положение пунктов микротриангуляции, полигонометрии и грунтовых марок находилось методом геометрического нивелирования II и IV классов соответственно. По завершению каждого цикла наблюдений полученные результаты обрабатывались и анализировались с точки зрения их точности. В качестве поверхности относимости была взята плоскость, равная средней высоте участка работ.

Система координат принята условная, плоская прямоугольная с началом вблизи участка работ так, чтобы абсциссы и ординаты пунктов наблюдательной станции не превышали 1 км. В соответствии с принятой поверхностью относимости и системой координат измеренные на местности длины сторон полигонометрии и базисная сторона микротриангуляции приводились только к горизонту, а измеренные углы и направления принимались плоскими.

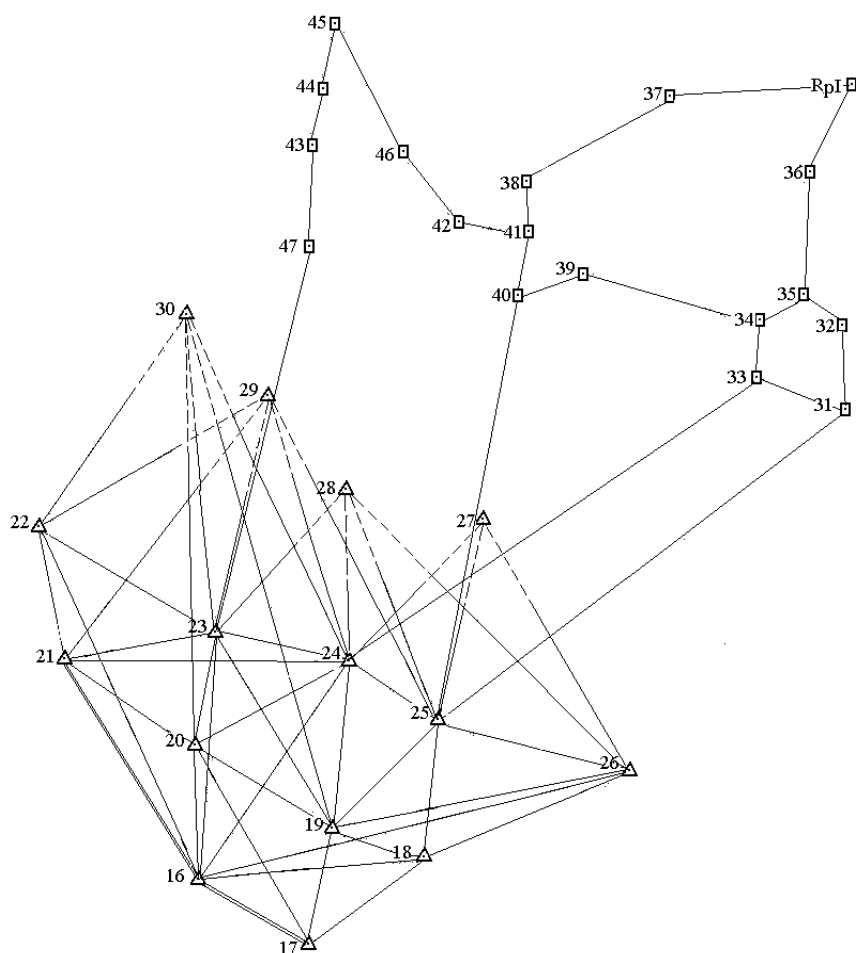
2.5. Методика натуральных геодезических наблюдений оползневых процессов на участках “Сокол” и “Сирко”

Получение максимально возможной и наиболее достоверной информации о кинематике оползневого склона как по площади, так и во времени достигается при условии реализации рационального проекта наблюдательной станции и выбора соответствующей методики геодезических наблюдений. Для достижения этой цели на участках были выбраны те методы наблюдений, которые в наших условиях дают наиболее высокую точность определения кинематических характеристик оползневых смещений. При определении кинематических характеристик очень важно установить, что смещения наблюдаемой точки свободны от влияния средней квадратической ошибки измерений.

Плановое положение пунктов микротриангуляции, а также пунктов, расположенных на подпорной стене, определялось методом триангуляции. Измерения направлений на пунктах выполнялись способом круговых приемов теодолитами ОТ-02М и ТБ-1.

Для определения планового положения опорных пунктов на застроенных склонах участков “Сирко” и “Сокол” применялся полигонометрический метод. Между опорными пунктами триангуляции прокладывались полигонометрические ходы повышенной точности.

В первом цикле наблюдений углы на участках “Сирко” и “Сокол” измерялись теодолитом ОТ-02М способом одиночного угла шестью приемами. В остальных циклах углы измерялись по той же методике теодолитом 2Т2 тремя приемами. Теодолит и марки на пунктах полигонометрии центрировались принудительно и линейные элементы центрирования и редукции не превышали 0,1 – 0,2 мм. Схемы полигонометрических ходов и их привязка показаны на рис. 2.7.



Δ, □ – пункты микротриангуляции и полигонометрии соответственно

Рис. 2.7. Схема сети опорных пунктов наблюдательной станции на участке “Сокол”

Длины линий в ходах полигонометрии измерялись светодальномером МСД-1М. Поправки за переход к горизонтальному расстоянию вычислялись по формуле

$$\Delta S_h = -\frac{h^2}{2S} - \frac{h^4}{8S^3},$$

где h – разность высот приемопередатчика и горизонтальной оси призмы вращения отражателя.

Метод прямых засечек заключается в измерении направлений с нескольких стабильных опорных пунктов на данную оползневую марку. В качестве стабильных пунктов на участке “Сокол” принимались пункты триангуляции 22, 23, 24, 25, расположенные на левом склоне балки (см. рис. 2.4, б). На каждом пункте измерялись направления на все грунтовые марки второй и третьей групп профильных линий, расположенных по склону (рис. 2.9, а). Уравнивание геодезических засечек выполнялось совместно с сетью триангуляции.

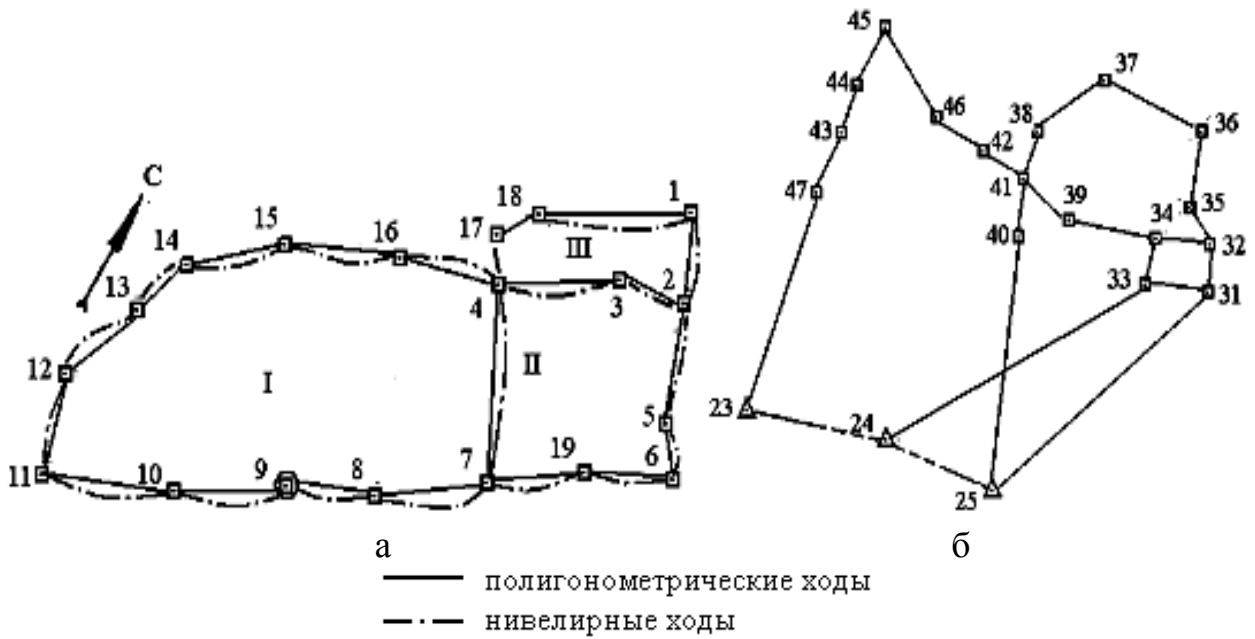


Рис. 2.8. Схемы полигонометрических ходов: а – участок “Сирко”: 1, 2, ..., 19 – исследуемые пункты; 9 – пункт с исходной высотой; 9 – 10 – исходное направление; б – участок “Сокол”: 23 – 24 – исходные пункты; 31 – 47 – исследуемые пункты

Метод расстояний представляет собой систематическое измерение расстояний между неподвижными опорными пунктами и подвижными оползневыми марками (рис. 2.9, б). Расстояния между опорными пунктами и оползневыми марками на участке “Сокол” измерялись светодальномером МСД-1М на трех частотах, причем на третьей частоте – измерялись двумя приемами для контроля.

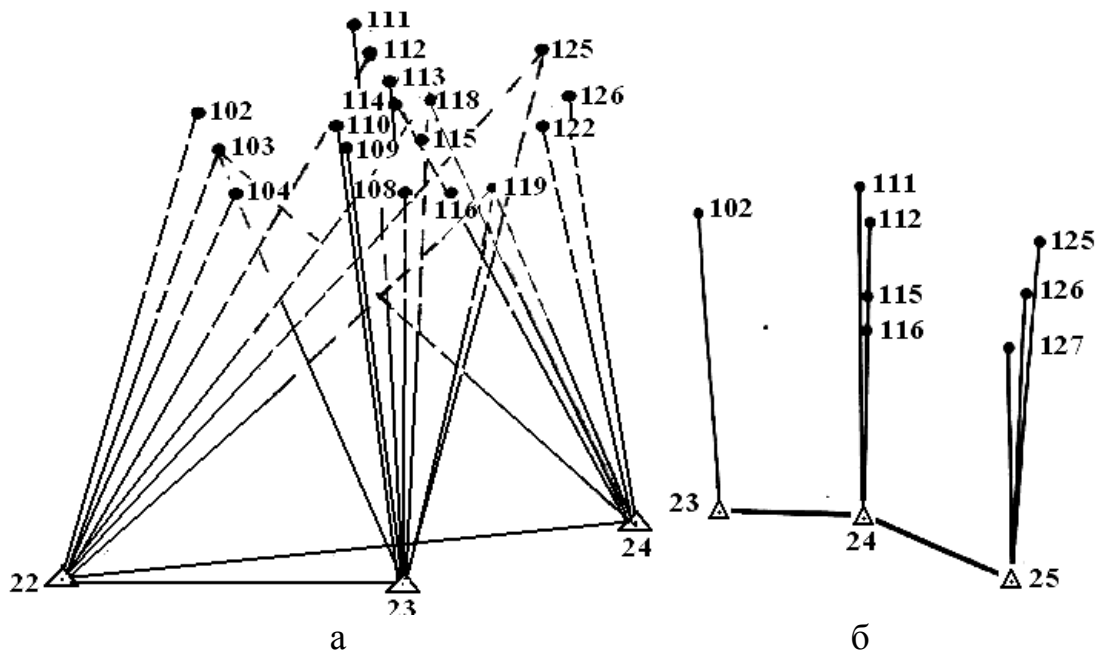


Рис. 2.9. Схемы определения положения оползневых марок двумя методами: прямой геодезической засечки (а) и – расстояний (б)

Смещения оползневых марок профильных линий № 1 – 15 на участке “Сирко” в плане определялись измерением расстояний между ними стальной компарированной рулеткой длиной 50 м. Натяжение рулетки осуществлялось с помощью динамометра силой 10 КГС. В измеренные наклонные расстояния интервалов вводились поправки за компарирование, температуру и превышение между пунктами. Привязка профильных линий в плане выполнялась непосредственно к пунктам полигонометрии промером рулеткой или к соответствующим сторонам полигонометрического хода.

Таким образом, на оползневых склонах, застроенных частными домами и постройками, где нет взаимной видимости между наблюдаемыми пунктами, наиболее целесообразно для геодезических измерений использовать метод расстояний, в зоне многоэтажной застройки прокладывать полигонометрические ходы повышенной точности. На наклонной поверхности, которая имеет взаимную видимость с противоположным склоном балки, не затронутым оползневыми подвижками, необходимо применять метод триангуляции или угловых засечек.

Для определения высотных отметок пунктов микротриангуляции и полигонометрии на участках “Сокол” и “Сирко” были проложены ходы методом геометрического нивелирования (см. рис. 2.8). Нивелирование пунктов микротриангуляции выполнялось нивелиром Копи-007 и инварными рейками по программе II класса, двумя ходами последовательно, а пункты полигонометрии – при двух горизонтах. Рейки при нивелировании II класса устанавливались на костылях, вбитых в землю.

Расхождение между превышениями на станции, вычисленные по основной и дополнительной шкале, не превышало 10 делений барабана, а расхождение превышений, полученных при нивелировании двумя приборами или одним при двух горизонтах, не превышало 12 делений барабана, т. е. 0,6 мм. Нивелирование оползневых марок выполнялось геометрическим нивелированием по программе нивелирования IV класса.

Математическая обработка результатов на обоих участках сводилась, в первую очередь, к вычислению координат и высот оползневых пунктов. Обработка наблюдений микротриангуляции и полигонометрии выполнялась по стандартной программе “Уравнение линейно-угловых сетей” на ЭВМ ЕС-1034, а с 1996 г. – в программе “Инвент-Град”. Уравнивались нивелирные хода на обоих участках в каждом цикле способом полигонов проф. В.В. Попова. При этом в качестве условной длины ходов (звеньев) принималось число штативов.

Точность результатов и достоверность информации достигалась построением рациональных схем наблюдательных станций и применением наиболее оптимальных в данных условиях методов измерений и точных современных геодезических приборов. Достоверность характеристик смещений гарантируется средними квадратическими ошибками измерений углов m_{β} : в микротриангуляции 1,3 – 2,0" и единицы веса $p = 1,232$, в полигонометрии и геодезических засечках $m_{\beta} = 3 - 4"$.

Точность положения пунктов наблюдательных станций в плане характеризуется средними квадратическими ошибками M из уравнивания, мм: в плане для опорных пунктов микротриангуляции $M \leq 3$; для пунктов полигонометрии $M \leq 15$; для грунтовых марок $M \leq 20$.

По высоте для опорных пунктов микротриангуляции и полигонометрии средняя квадратическая ошибка составила $M \leq 2 - 3$ мм; для грунтовых марок – $M \leq 3 - 5$ мм.

2.6. Исследование кинематических характеристик оползневых смещений

Целью геодинимических наблюдений является получение достоверных данных о кинематике оползневого массива по площади и во времени. Выполненные натурные инструментальные наблюдения на участках “Сокол” и “Сирко” характеризуются тем, что они охватывают многолетний период наблюдений (1984 – 1994 гг.). На основании результатов наблюдений и их аналитической обработки определяются величины пространственных смещений пунктов наблюдательных станций за определенный промежуток времени, которые являются основными характеристиками динамики оползневого процесса. В ходе сползания склона оползневая точка проходит в пространстве криволинейную траекторию в горизонтальной и вертикальной плоскости, при этом скорости смещения изменяются. Величины пространственных смещений точек, расположенных на оползневом склоне, а также изменение скорости и ускорений за определенный промежуток времени являются **кинематическими характеристиками** оползневых смещений или **параметрами** оползневого процесса.

Основные кинематические характеристики оползневых смещений точки определяются по известным в геодезии формулам, которые позволяют получать составляющие траектории ее движения в пространстве за некоторый промежуток времени

$$\left. \begin{aligned} \Delta X_{ij} &= X_j - X_i \\ \Delta Y_{ij} &= Y_j - Y_i \\ \Delta H_{ij} &= H_j - H_i \end{aligned} \right\},$$

где ΔX_{ij} , ΔY_{ij} , ΔH_{ij} – смещения точки за определенный промежуток времени Δt , (i – предыдущий цикл, j – текущий цикл); X_i , Y_i , H_i ; X_j , Y_j , H_j – координаты оползневой точки предыдущего и текущего циклов наблюдений [53, 54].

Плановое смещение точки составит

$$\Delta S_{ij} = \sqrt{\Delta X_{ij}^2 + \Delta Y_{ij}^2}.$$

Пространственное смещение выражается формулой

$$\Delta L_{ij} = \sqrt{\Delta X_{ij}^2 + \Delta Y_{ij}^2 + \Delta H_{ji}^2}$$

или

$$\Delta L_{ij} = \sqrt{\Delta S_{ij}^2 + \Delta H_{ij}^2}.$$

Дополняет кинематические характеристики оползневых смещений за определенный промежуток времени Δt средняя скорость $\mathcal{G}(S_{ij})$ и ускорение горизонтальных $w(S_{ij})$ и вертикальных $w(h_{ij})$ смещений

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{G}(S_{ij})_{cp} &= \Delta S_{ij} / \Delta t_{ij} \\ w(S_{ij})_{cp} &= \mathcal{G}(S_{ij})_{cp} / \Delta t_{ij} \end{aligned} \right\},$$

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{G}(h_{ij})_{cp} &= \Delta h_{ij} / \Delta t_{ij} \\ w(h_{ij})_{cp} &= \mathcal{G}(h_{ij})_{cp} / \Delta t_{ij} \end{aligned} \right\}.$$

Среднюю скорость и ускорение смещения точки в пространстве соответственно находят из выражений

$$\mathcal{G}_{ij}(\Delta L_{ij})_{cp} = \frac{\Delta L_{ij}}{t_{ij}},$$

$$w(\Delta L_{ij}) = (\Delta L_{ij})_{cp} / \Delta t_{ij}.$$

Угол наклона вектора смещения к горизонту оползневой точки выразится формулой

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\Delta H_{ij}}{\sqrt{\Delta X_{ij}^2 + \Delta Y_{ij}^2}}.$$

Дирекционный угол полного смещения точки за определенный период наблюдений

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{Y_j - Y_i}{X_j - X_i} = \frac{\Delta Y_{ij}}{\Delta X_{ij}}.$$

Изучая кинематику оползневых процессов, необходимо также знать объем перемещения смещающихся масс, накопление или удаление их относительно основания склона, влияние их на изменение равновесия склонов. Изменение объема смещающихся масс горных пород за промежуток времени Δt_{ij} находят из уравнения

$$\Delta V_{ij} = V_j - V_i,$$

где V_i , V_j – объемы смещающихся масс горных пород за текущий и предыдущий циклы наблюдений.

Изменение объема смещающихся масс можно определять как разность поверхностей изосмещений между циклами наблюдений или относительно начального цикла.

Вычитание поверхностей дает объем снесенных или отложенных оползневых масс по всей площади смещающегося массива. Компьютерное моделирование позволяет выполнять аппроксимацию для поверхности любой сложности [65]. Расчеты всех составляющих параметров оползневого процесса и графические построения удобно выполнять в программах Microsoft Excel и Surfer.

Задачи исследований заключались не только в определении параметров оползневых процессов на участках “Сокол” и “Сирко”, но и в выявлении факторов, влияющих на эти процессы.

Среди многих факторов, формирующих образование и развитие оползневых процессов, для исследований выбраны форма и условия залегания пород склонов и атмосферные осадки. Форму и условия залегания пород определяют **геометрические параметры** инженерно-геологических элементов строения склона, значения которых по площади в разных точках поверхности различны. К таким геометрическим параметрам строения склона отнесены:

- углы наклона и падения (рельеф) склона;
- углы наклона и направления заложения кровли водоупорного слоя;
- мощность пород до кровли водоупорного слоя;
- углы наклона и углы направления заложения поверхности водоносного горизонта;
- мощность пород до водоносного горизонта;
- глубина водоносного горизонта;
- мощность водоносного горизонта;
- индекс обводнения;
- уровень подземных вод.

В комплексе параметры оползневого процесса и геометрические параметры строения склона представляют **кинематическую модель оползневого склона**, которая имеет обобщенный вид:

$$\left. \begin{aligned} F(X_i, Y_i, Z_i) &= f\{(G_i); (P_i)\}; \\ f_1(G_i) &= f_1\{(\Theta_i); (L_i)\}; \\ f_2(\Theta_i) &= f_2(\delta_{bc}, \delta_{bz}, \beta_p, \alpha_{bc}, \alpha_{bz}); \\ f_3(L_i) &= f_3(p_{mo}, g_{bz}, p_{bz}, w_{ув}, I_a); \\ f_4(P_i) &= f_4\{(\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta H_i, \Delta S_i, \Delta L_i; \mathcal{G}_{Si}, \mathcal{G}_{Hi}, \omega_{Si}, \omega_{Hi}, \beta_i, \alpha_i)\} \end{aligned} \right\},$$

где $F(X_i, Y_i, Z_i)$ – положение точек оползневого склона в пространстве за определенный период времени; $f_1(G_i)$ – геометрические параметры инженерно-геологического строения склона: $f_2(\Theta_i)$, $f_3(L_i)$, $f_4(P_i)$ – угловые, линейные и кинематические характеристики смещений точек соответственно; (Θ_i) – угловые показатели геометрических параметров строения склона: δ_{bc} , δ_{bz} , β_p , α_{bc} , α_{bz} – углы наклона кровли водоупорного слоя, поверхности водоносного горизонта и рельефа, дирекционные углы (направление) заложения водоупорного слоя и водоносного горизонта; (L_i) – линейные показатели геометрических параметров строения склона: p_{mo} – мощность оползня до поверхности скольжения; g_{bz} – глубина водоносного горизонта; p_{bz} – мощность водоносного горизонта; $w_{ув}$ – уровень подземных вод, I_a – индекс обводнения; (P_i) – кинематические характеристики оползневых смещений: $\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta H_i$ – составляющие смещения точки в пространстве; $\Delta S_i, \Delta L_i$ – смещения точки в плане и в пространстве; $\mathcal{G}_{Si}, \mathcal{G}_{Hi}, \omega_{Si}, \omega_{Hi}$ – средняя скорость и ускорение горизонтальных и вертикальных смещений точек; β_i, α_i – угол наклона вектора смещений к горизонту и дирекционный угол направления смещений точек в пространстве; i – номер оползневой точки.

Для установления влияния атмосферных осадков на развитие оползневых процессов вычислялось количество среднемесячных и среднегодовых осадков a_i в данном регионе за определенный период.

В ходе исследований смещений оползневых склонов особое внимание должно уделяться изучению **стабильности опорных пунктов** наблюдательных геодезических сетей, так как неверная информация об их стабильности может привести к неверным заключениям о развитии динамики оползневого

процесса. При этом важно установить, что разность координат между циклами – не погрешности измерений, а изменения устойчивости пункта.

Исследование стабильности опорных пунктов выполнялось с использованием **вероятностно-статистического анализа**. По мере накопления данных наблюдений пунктов для анализа их стабильности достаточно эффективным считается применение способа последовательных разностей [57]:

$$d_j = \Delta S_{i+1} - \Delta S_i.$$

Среднее квадратическое отклонение одной такой разности будет

$$m(d) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n d_j^2}{2n}},$$

где ΔS_i и ΔS_{i+1} – значения координат, высот, длин и т.д. предыдущего и текущего циклов; n – число разностей d_j (координат, высот, длин и т. д.).

Нарушение устойчивости пунктов наблюдательной станции удобно проверять при помощи критерия Аббе

$$q = m^2(d)/m^2(x),$$

где $m(d)$ – средняя квадратическая ошибка отклонения разности измерений; $m(x)$ – средняя квадратическая ошибка определения по разности двойных измерений координат.

Величина статистики q представляет собой отношение оценок дисперсий, характеризующих в знаменателе разброс общего среднего, а в числителе – взаимный разброс соседних значений, т. е.

$$q = \frac{1}{2} \frac{\sum_{j=1}^n d_j^2}{\sum_{j=1}^n (\Delta S_i - \Delta \bar{S})^2}, \quad (2.1)$$

где $\Delta \bar{S}$ – среднее значение разности,

$$\Delta \bar{S} = \frac{\left[\sqrt{\left(X_j - X_i \right)^2 + \left(Y_j - Y_i \right)^2} \right]}{n} = \frac{[\Delta S]}{n}.$$

Иногда по результатам геодезических наблюдений трудно утвердительно ответить о наличии оползневых смещений на склоне. Тогда вышеприведенный приём вероятностно-статистического анализа дает возможность с определенной доверительной вероятностью однозначно ответить на поставленный вопрос. Согласно критерию Аббе гипотеза о равенстве средних отвергается, если значение статистики q меньше критической области $q_{кр}$, т. е. $q < q_{кр}$. Если $q > q_{кр}$ гипотеза принимается и наблюдаемые пункты будут стабильными.

Сравним положение пунктов на участке “Сокол” в различных зонах оползневого массива для анализа их стабильности. Положение каждого пункта определено по результатам 17 циклов геодезических наблюдений. Например, среднее значение планового положения пункта 29, расположенного на подпорной стене, из всех циклов наблюдений будет

$$\Delta \bar{S} = \frac{\sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2}}{n} = 495,130 \text{ м.}$$

Величина статистики q , полученная по формуле (2.1), равна 0,032. По заданной доверительной вероятности $p = 0,001$ и числу степеней свободы $k = 16$ из статистических таблиц находим значение критической области $q_{кр} = 0,341$, т. е. $q < q_{кр}$. Следовательно, гипотеза о равенстве средних с уровнем значимости доверительной вероятности $p = 0,001$ отвергается и в изменении положения пункта присутствуют смещения. Для пункта 45, расположенного на бровке склона балки $q = 0,673$, $q_{кр} = 0,341$, т. е. $q > q_{кр}$, значит, положение его можно считать стабильным. Пункт 126, расположенный на оползневом склоне, для которого $q = 0,026$, $q_{кр} = 0,341$, следовательно, $q < q_{кр}$ и пункт находится в зоне смещений.

Проанализировав состояние опорных пунктов, можно сделать вывод, что все пункты первой группы, кроме 39, 40 – 44, 47, находятся в состоянии стабильности, т. е. $q > q_{кр}$. Пункты же второй группы, наоборот, охвачены критической областью $q < q_{кр}$, и это говорит об их динамике. Аналогичные вычисления выполнены для опорных пунктов на участке “Сирко”. Опорные пункты первой группы (7, 8, 9, 10), расположенные выше бровки склона на улице Ясной и изначально были приняты как исходные, находятся в неизменном положении, т. е. $q < q_{кр}$, что соответствует их стабильности. А пункты второй группы, расположенные на склоне балки, смещаются в пределах средних квадратических ошибок геодезических измерений.

При этом следует отметить, что все полученные параметры кинематики оползневых склонов соответствуют гидрогеологическим характеристикам пород и физико-механическим свойствам грунтов на момент наблюдений.

По результатам наблюдений и их математической обработки были определены оползневые смещения пунктов наблюдательных станций в зависимости от их расположения за период с 1984 по 1994 год на участках “Сокол” и “Сирко” (табл. 2.4, 2.5).

Таблица 2.4

Смещения пунктов на оползневых участках в зависимости от их расположения на склоне

№ пунк- тов	Циклы наблюдений																ΣS , мм	$\Sigma S/n$, мм
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
Участок “Сокол”.																		
Горизонтальные смещения пунктов на застроенной территории, мм																		
45	12	5	9	19	30	11	15	2	6	20	29	31	19	21	8	7	244	15
44	12	5	11	37	22	13	10	5	5	17	19	32	20	13	4	3	228	14
43	5	8	5	30	12	8	15	7	36	28	18	35	21	12	19	21	280	18
46	7	9	18	12	20	8	7	6	8	7	24	29	11	13	4	4	188	12
42	3	24	30	42	15	11	12	5	48	13	28	53	43	6	34	19	386	24
39	3	15	8	2	10	14	15	6	31	25	21	25	19	9	7	3	213	13
47	4	15	8	33	34	31	14	21	57	62	20	49	59	19	32	51	509	32
ΣS	56	81	89	175	143	96	88	52	191	172	159	254	192	93	108	108	2054	18,3
$\Sigma S/n$	8	12	13	25	20	14	13	7	28	25	23	36	27	14	15	15	18,3	
Горизонтальные смещения пунктов на естественном склоне, мм																		
112		8	0	29	130	50	8	21	57	56	63	62	28	13	49	52	626	42
115		14	44	93	141	32	16	20	61	60	60	60	62	21	78	32	794	46
116		77	76	77	77	30	17	17	50	50	50	50	52	11	97	17	748	50
118			120		22	55	39	24	84	26	100	45	76	14	70	62	737	52
126		15	34	28	97	53	17	22	80	75	85	62	41	25	54	53	741	49
127			49	47	204	42	22	28	50	51	141	21	74	22	57	58	866	58
ΣS		114	323	274	671	262	119	132	382	318	499	300	333	106	405	274	4512	50,2
$\Sigma S/n$		19	54	45	112	44	20	22	64	53	83	50	55	18	68	46	50,1	
Участок “Сирко”																		
Горизонтальные смещения пунктов на застроенном склоне, мм																		
1	49	37	17	32	26	29	18	23	5	20	20	8	3	3	9	7	306	19
2	6	14	12	25	41	18	17	21	4	9	13	9	3	4	6	11	214	13
3	13	12	9	25	39	18	16	21	3	26	43	17	5	4	6	16	274	17
4	15	11	9	21	35	15	15	14	3	19	33	7	4	2	7	17	228	14
5	1	13	16	21	34	13	14	20	2	6	12	8	4	4	4	11	182	11
6	5	12	14	17	29	44	13	9	16	13	12	8	7	5	3	11	220	14
17	10	38	13	0	24	23	9	16	13	22	19	22	7	4	4	14	235	15
18	11	17	11	22	37	17	15	16	3	19	35	7	5	8	8	11	242	15
ΣS	110	154	101	163	265	177	117	140	49	134	187	86	38	34	47	98	1900	15
$\Sigma S/n$	14	19	13	20	33	22	15	18	6	17	23	11	5	4	6	12	15	

Таблица 2.5

Ведомость смещений оползневых марок по профильной линии № 15 на склоне участка “Сирко”

Название линий	12 – 150	150 – 87	87 – 70	70 – 145	145 – 75	75 – 113	113 – 138	138 – 123	123 – 37	137 – 126	ΣS , мм	$\Sigma S/n$, мм
Циклы												
Начальный (ос.1985 г.)	Изменение длин линий между оползневыми марками профильной линии, мм											
Весна 1986 г.		0	5	1	7	5	9	8	4	5	44	4,4
Осень 1986 г.	4	-1	7	2	0	-15	0	-2	6	-6	-5	-0,5
Весна 1987 г.		0	2	-5	-5	-6	-6	-1	-1	4	-18	-1,8
Осень 1987 г.		-2	-2	0	-2	1	-2	1	-6	-11	-23	-2,3
Весна 1988 г.	6	3	5	5	6	2	3	3	4	1	38	3,8
Осень 1988 г.	0	-4	-2	-5	-6	-5	-4	-4	-2	-6	-43	-4,3
Весна 1989 г.	0	5	5	5	8	8	-4	6	-2	10	41	4,1
Осень 1989 г.	0	-3	1	-2	-6	-1	7	-1	-2	-3	-10	-1,0
Весна 1990 г.	0	-2	-1	-3	-3	-6	-5	-4	3	-2	-23	-2,3
Осень 1990 г.							3	-2	-4	7	4	1,0
Весна 1991 г.							4	1	3	-1	7	1,8
ΣS , мм	10	-4	20	-2	-1	-17	5	5	3	-2	17	1,7
$\Sigma S/n$, мм	1,1	-0,4	2,2	-0,2	-0,1	-1,9	0,45	0,45	0,3	-0,2	1,7	
Вертикальные смещения, мм												
ос.1985 г.	1	1	-1	-1	-2	-8	-13	-14	-19	-18	-74	-7,4
Весна 1986 г.	-3	-2	-2	-1	-1	-2	-2	-1	-1	-1	-16	-1,6
Осень 1986 г.	0	0	-2	-5	-6	-14	-16	-19	-19	-32	-112	-11,2
Весна 1987 г.	1	0	-1	1	0	8	9	12	25	22	77	7,7
Осень 1987 г.	-1	0	0	0	-2	-2	-2	-2	-11	-16	-36	-3,6
Весна 1988 г.	-1	-2	1	1	4	5	5	3	6	6	28	2,8
Осень 1988 г.	1	2	2	2	1	0	2	4	-4	-1	9	0,9
Весна 1989 г.	0	0	0	1	1	-1	1	5	-19	12	0	0
Осень 1989 г.	-2	-2	-4	-5	-5	-5	-8	-10	-7	-21	-69	-6,9
Весна 1990 г.	3	3	4	4	4	9	10	12	13	15	77	7,7
Осень 1990 г.	-3	-3	-2	-2	-10	-12	-14	-12	-21	-2	-81	-8,1
Весна 1991 г.	0	1	2	2		9	10	12	14	17	67	6,7
Осень 1991 г.	1	2	1	0		-2	-5	-7		-13	-23	-2,3
Весна 1992 г.	0	0	0	1		1	3	4		9	18	1,8
Осень 1992 г.	0	1	-2	-5		-6	-9	-10		-18	-49	-4,9
Весна 1993 г.	1	0	2	4		2	3	7		17	36	3,6
ΣS , мм	-2	1	-2	-3	-16	-18	-26	-16	-43	-24	-149	-9,3
$\Sigma S/n$, мм	-0,1	0,1	-0,2	-0,2	-1,0	-1,1	-1,6	-1,0	-2,7	-1,5	-9,3	

По результатам оползневых смещений на участках “Сокол” и “Сирко” составлена таблица кинематических характеристик смещений пунктов наблюдательных станций (табл. 2.6).

Таблица 2.6

Значения кинематических характеристик смещений пунктов наблюдательных станций на оползневых участках “Сокол” и “Сирко”

№ пункта	$\Sigma\Delta S$, мм	$\Sigma\Delta H$, мм	\mathcal{G}_S , мм/мес	\mathcal{G}_H , мм/мес
Участок “Сокол”				
Пункты на водораздельном плато				
42	386	-252	4,0	2,6
43	280	-153	2,9	1,6
47	509	-121	5,3	1,3
Пункты на естественном склоне				
115	794	-166	8,8	1,8
116	748	30	8,3	0,3
118	737	-600	8,2	6,7
126	741	-289	8,2	3,2
127	866	-92	9,6	1,0
Пункты на подпорной стене				
27	272	-10	2,8	0,1
28	277	1	2,9	0,0
29	721	-23	7,5	0,2
30	517	-1	5,4	0,0
Участок “Сирко”				
Пункты на водораздельном плато				
1	306	-101	3,2	0,3
2	214	-7	2,2	0,1
3	274	-12	2,9	0,2
4	228	-13	2,4	0,2
14	174	-22	1,8	0,2
18	242	-44	2,5	0,4
Пункты на естественном склоне				
126	8	-13	0,45	0,3
123	10	-8	0,14	0,1
138	17	-8	0,23	0,1
137	8	-14	0,13	0,1
110	1	-6	0,02	0,1
97	-5	-11	0,08	0,1

С учетом характеристик склонов, геометрических параметров инженерно-геологического строения склона выполнена типизация кинематических характеристик оползневых смещений наблюдаемых пунктов (табл. 2.7).

На участке “Сокол” пункты наблюдательной станции были разделены на три группы:

первая – средняя скорость горизонтальных смещений не превышает 4 мм/мес, пункты полигонометрии 31 – 47 расположены в районе многоэтажной застройки на водораздельном плато, где угол крутизны β не превышает 5^0 ;

вторая – средняя скорость горизонтальных смещений не превышает 10 мм/мес, грунтовые марки 101 – 127 заложены в средней и нижней частях застроенного склона над подпорной стеной, угол крутизны β склона изменяется от 6 до 9^0 ;

третья – средняя скорость смещений за период наблюдений не превысила 3 мм/мес, грунтовые марки 141 – 164 заложены на естественном склоне, предположительно вне зоны оползневых подвижек, угол крутизны β находится в пределах 8 – 14^0 .

Таблица 2.7

Взаимосвязь кинематических характеристик оползневых смещений и характеристики склона на участке Сокол

Характеристика склона					Геометрические параметры строения склона				Кинематические характеристики смещений		
Группа пунктов	Пункты профильных линий	Коэффициент застройки K_3	Величина заложения склона $B, м$	Высота склона $H, м$	Угол крутизны рельефа по линии $tg\beta = \frac{H}{B}$	Уклон кровли водопорного слоя, град	Средняя мощность до кровли водопора, м	Средняя глубина водонесного горизонта, м	Средняя скорость, мм/мес		Направление вектора смещений, град
									горизонтальных смещений	вертикальных смещений	
Первая	36–34	0,57	122,3	2,5	1,5	0	-	-	1,6	0,03	327
	38–40	0,57	85,1	6,3	4,2	0,4	18,5	14	1,9	0,24	242
	45–47	0,57	173,2	15,4	5,0	2,5	19,5	13,5	3,9	0,58	237
Вторая	46–111	0,57	108,1	12,1	6,4	4,6	20,5	13,5	4,4	0,72	227
	111–116	0,12	98,1	11,3	6,5	4,6	17,5	9,5	7,6	1,35	177
	47–104	0,12	90,3	10,5	6,6	4,7	14,5	7,5	5,7	-	190
	40–127	0,12	121,8	19,0	8,9	5,4	12,0	9,0	9,9	-	209
Третья	31–149	0,12	167,3	24,7	8,4	-	-	-	1,8	-	285
	32–157	0,12	186,0	27,0	8,2	-	-	-	2,5	-	274
	159–164	0,00	94,0	24,0	14,3	-	-	-	2,8	-	60

Пункты наблюдательной станции на оползневом участке “Сирко” разделены на две группы:

первая – пункты полигонометрии 7 – 19, расположенные на застроенной территории по улице Ясной, Сирко и переулку Баскетбольному, угол крутизны склона $\beta = 1,5 - 4^0$;

вторая – оползневые грунтовые марки 40 – 150, расположенные на склоне балки по профильным линиям № 1 – 15, угол крутизны $\beta = 13 - 15^0$.

В соответствии с поставленной задачей выполнены исследования кинематических характеристик смещений всех пунктов наблюдательной станции на участках “Сокол” и “Сирко”.

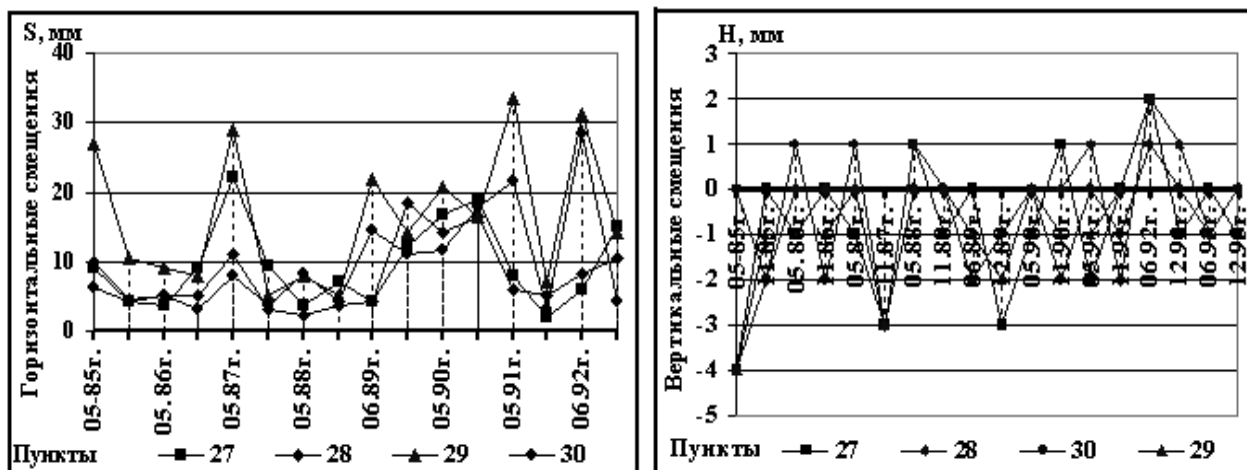
На участке “Сокол” особое внимание было уделено геодезическим наблюдениям пунктов на противооползневом сооружении – подпорной стене при оценке её устойчивости и эффективности. Такие наблюдения дают возможность изучить действительную работу сооружения, и это является одним из важных путей для правильного решения выбора материала и конструкции при проектировании и изготовлении противооползневых мероприятий, которые нередко эксплуатируются в агрессивной среде. Исследования кинематических характеристик оползневых смещений склонов показали некоторые особенности протекания оползневого процесса на обоих участках.

Участок “Сокол”. Результаты наблюдений за пространственным положением пунктов 27, 28, 29 и 30 на подпорной стене показывают, что смещения происходят в направлении балки. Максимальная сумма горизонтальных смещений за 1984 – 2001 гг. составила 721 и 277 мм на 29 и 28 пунктах соответственно (см. табл. 2.6). Это говорит о том, что поверхность скольжения проходит ниже основания подпорной стены. Разные величины средних скоростей смещений – максимальная 3,53 и минимальная 1,31 мм/мес, так как различны гидрогеологические условия участка, на котором расположена подпорная стена.

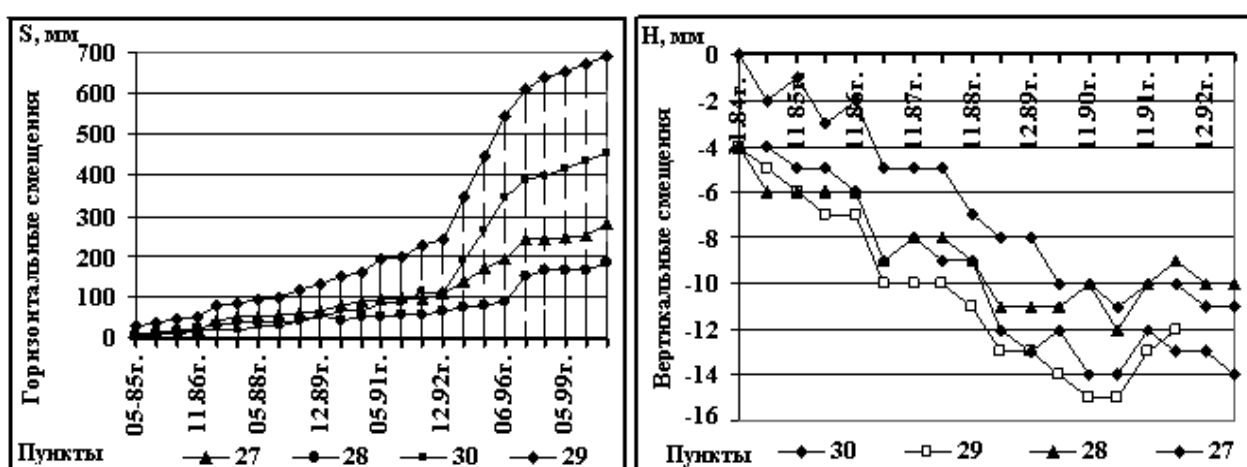
Величины горизонтальных и вертикальных смещений этих пунктов между циклами “весна – осень” имеют неравномерный характер. Наибольшие смещения наблюдаются в весенние циклы на пунктах 29, 30, что связано, по всей видимости, с поднятием уровня подземных вод и мощностью пород до кровли водоупорного слоя. Динамика смещений пунктов между циклами “весна – осень” и относительно начального цикла за период 1985 – 1993 гг. представлена на рис. 2.10 .

Для установления факта, находится ли подпорная стена в вертикальной плоскости, проводились специальные наблюдения, на основании которых пришли к выводу, что при смещении подпорная стена как в плане, так и по высоте практически сохраняет свое вертикальное положение, что свидетельствует о ее перемещении по кровле водоупорного слоя под давлением смещающихся масс пород.

За весь период эксплуатации подпорной стены с 1984 по 2009 годы кроме инструментальных наблюдений были проведены визуальные – исследовано её состояние, положение и растительный покров вокруг. Особое внимание уделялось выявлению трещин, состоянию швов, а также проверялась отвесность стены. На основании исследований было установлено, что по всей длине стены с обеих ее сторон присутствует буйная растительность.



a



б

Рис. 2.10. Динамика смещения пунктов на подпорной стене: между циклами “весна – осень” (а) и относительно начального цикла (б) – осень 1984 г.

Результаты измерений показали, что, несмотря на происшедшие деформации, подпорная стена свою отвесность сохраняет и продолжает удерживать смещающийся массив.

В районе пункта 29 тальвег балки заболоченный. Вдоль восточной части стены (пункты 27 и 28) со стороны склона растет непроходимый камыш, со стороны тальвега – высокая травянистая растительность, что свидетельствует о поднятии уровня грунтовых вод и обводнении грунта. Так, на некоторых плитах подпорной стены выявлены трещины, более шести швов, соединяющие плиты, пустые. В районе пункта 28 происходит смещение двух плит больше чем на 20 см в сторону тальвега балки (рис 2.11, а, б, в).



а

б

в

Рис. 2.11. Образцы деформации подпорной стены: а – трещины; б – пустые швы; в – сдвиг плит

Несколько иначе обстоят дела с устойчивостью наблюдательных пунктов первой группы, расположенных на застроенной высотными зданиями территории. Максимальная сумма горизонтальных смещений этих пунктов за период наблюдений 1984 – 2001 гг. составила 496 и 1420 мм пунктов 43 и 47 соответственно (см. табл. 2.6). При закладке на участке “Сокол” пунктов полигонометрии предполагалось, что большинство их будет располагаться за пределами зоны влияния оползневых процессов. Однако, как установлено по результатам наблюдений, пункты 42, 43, 44 и 47, расположенные в непосредственной близости от жилых многоэтажных домов, затронуты оползневыми смещениями (рис. 2.12).

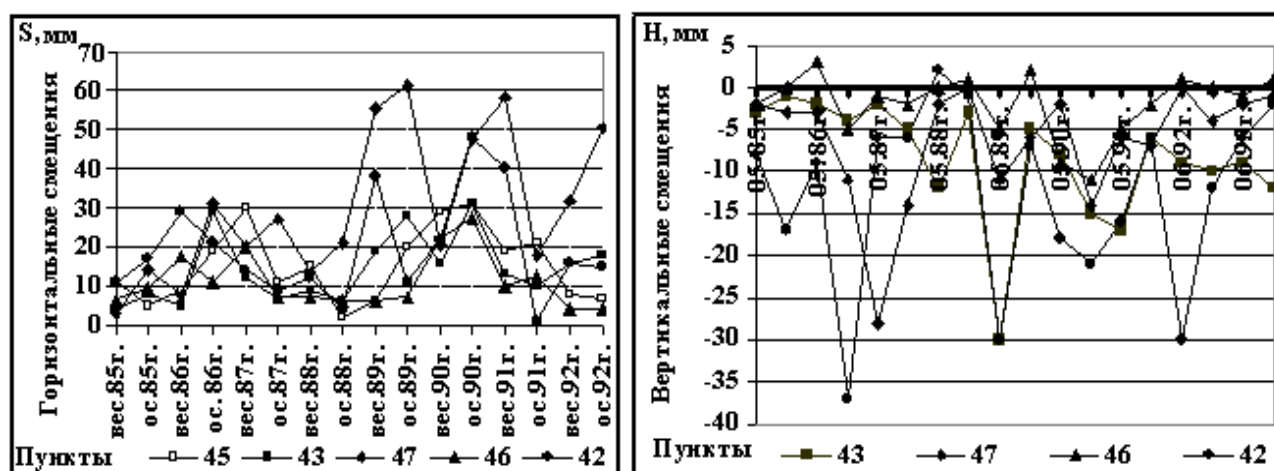
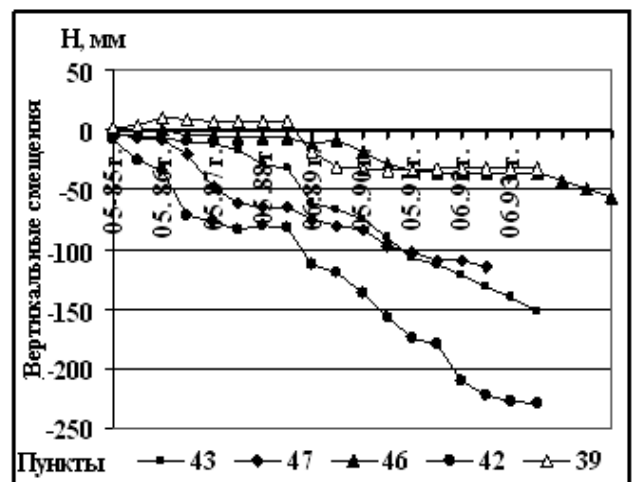
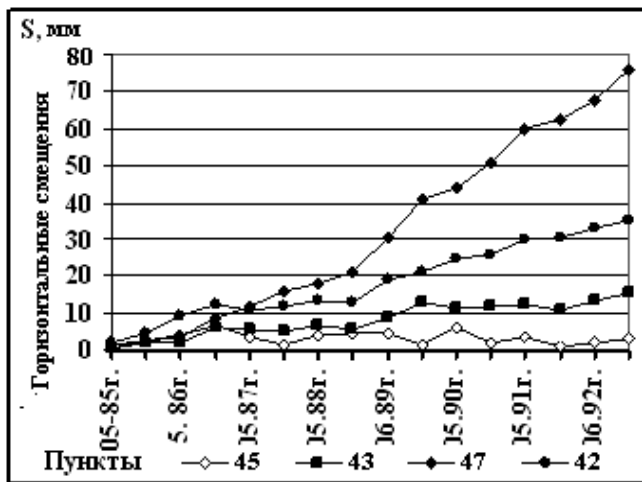


Рис. 2.12. Динамика смещения пунктов первой группы между циклами “весна – осень” (участок “Сокол”)

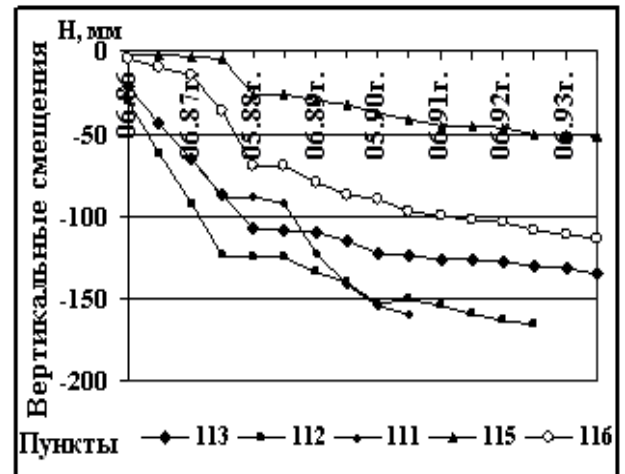
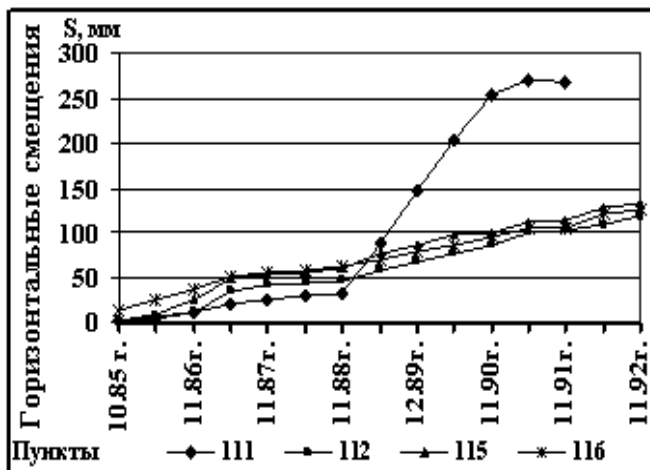
Исследованиями установлено, что смещения пунктов первой группы, расположенных на водораздельном плато, не превышают среднюю квадратическую ошибку положения, определенную из уравнивания, за исключением вышеупомянутых пунктов. Максимальные вертикальные смещения за период наблюдений составили 252 (пункт 42), а минимальные 57 мм (пункт 46), что свидетельствует о неравномерной деформации склона.

Из анализа кинематических характеристик оползневых смещений пунктов второй группы за период наблюдений 1984 – 1994 гг. на участке “Сокол” следует, что все пункты этой группы (102 – 127) находятся в зоне активных оползневых смещений (рис. 2.13, 2.14).



а

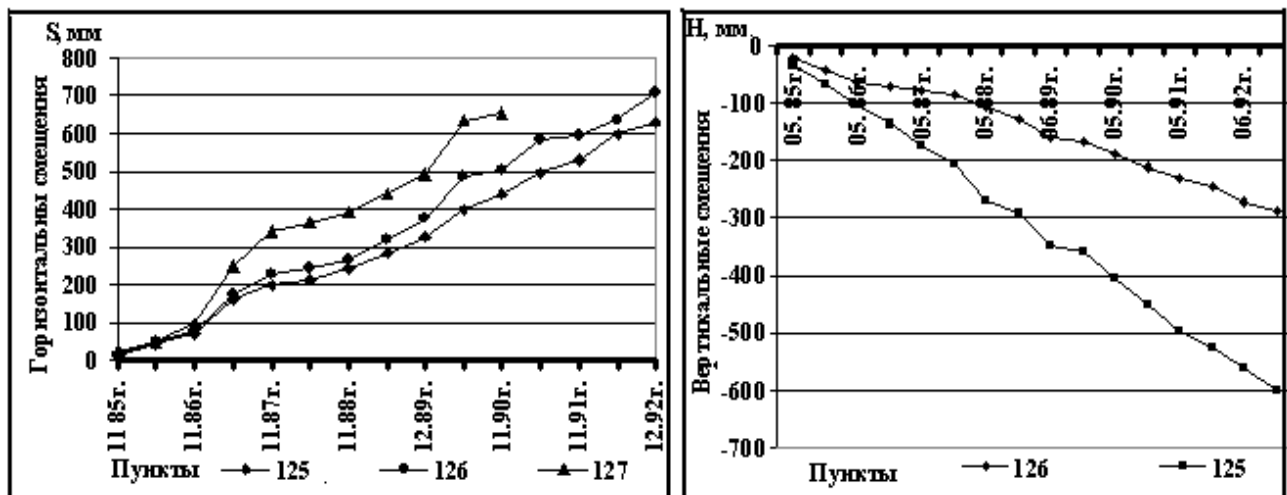
б



в

г

Рис. 2.13. Динамика смещений относительно начального цикла: пунктов первой группы (а, б) и (в, г) по линии 111 – 116 (участок “Сокол”)



а

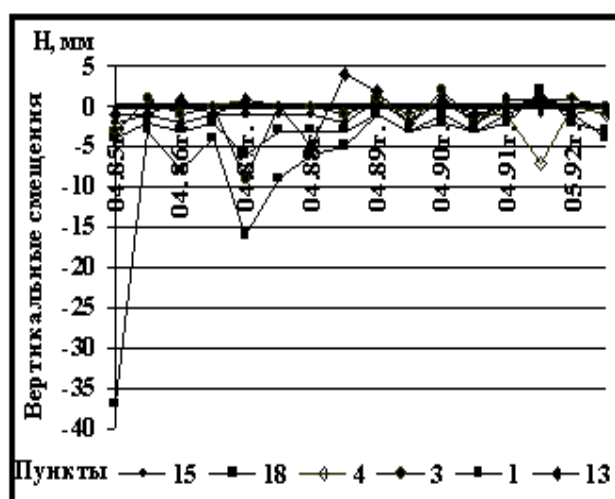
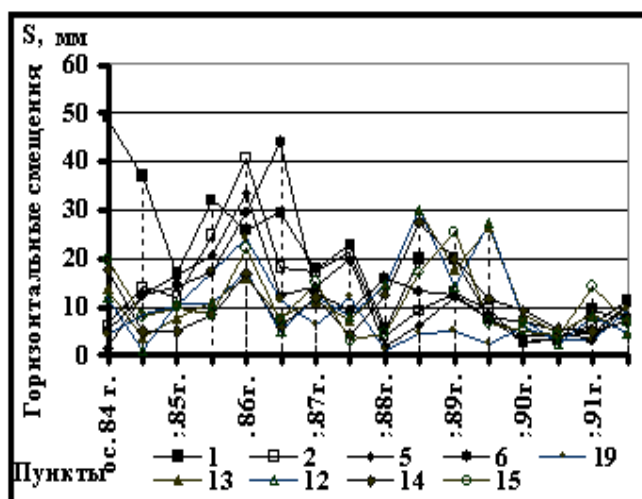
б

Рис. 2.14. Динамика смещений относительно начального цикла: пунктов второй группы (а, б) по линии 125 – 127 (участок “Сокол”)

Величины смещений пунктов второй группы и линейные графики изображений показывают, что горизонтальные смещения их значительно превышают смещения пунктов на подпорной стене. Это указывает на то, что некоторая часть оползневого тела наползает на нижележащие слои и со временем, достигнув подпорной стены, которая является противооползневым сооружением не жестким, а податливым, могут ее опрокинуть, что является весьма опасно для устойчивости склона, который она удерживает. Увеличивающаяся сползающая масса перемещается в тальвег балки, захватив при этом ранее не тронутые оползнем площади склона, или изменяет свое направление вдоль подпорной стены.

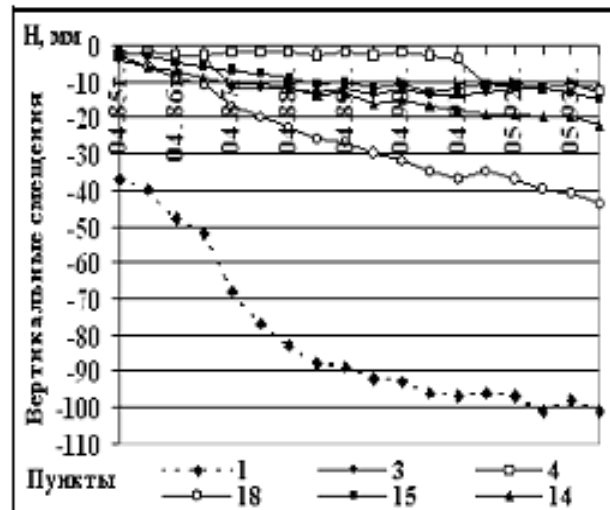
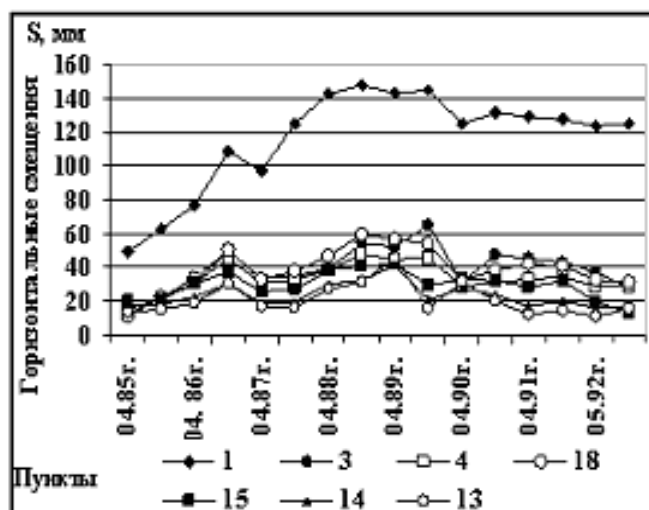
Участок “Сирко”. В отличие от участка “Сокол” на участке “Сирко” оползневые смещения более спокойные. На основании аналогичных исследований кинематических характеристик смещений оползневого склона на участке “Сирко” установлено, что деформации большей части склона за период наблюдений не произошло. Горизонтальные величины смещений за 1984 – 1994 гг. характеризуют стабильность положения большинства пунктов наблюдательной станции.

С начала наблюдений они уменьшались и не превышали среднеквадратической ошибки положения пункта в плане и по высоте. Величины смещений и вероятность их возникновения подтверждают эффективность выполненных противооползневых мероприятий на оползневом склоне балки Красноповстанческая. Динамика смещений пунктов первой группы на участке “Сирко” между циклами и относительно начального цикла приведена на рис. 2.15.



а

б



в

г

Рис. 2.15. Динамика смещений во времени опорных пунктов первой группы: (а, б) – между циклами “весна – осень” и (в, г) – относительно начального цикла (участок “Сирко”)

Выводы. Из вышеизложенного следует, что на территории Днепропетровского региона наиболее часто проявляются глубокие, крупные и по своей структуре сложные с отчетливой поверхностью скольжения оползни, которые образуются на естественных склонах балок и оврагов с крутизной $80 - 90^{\circ}$ в однородной среде. Оползни покровных отложений небольшие по размерам развиваются на склонах крутизной $5 - 15^{\circ}$ редко до 55° .

Точность результатов и достоверность информации достигается путем построения рациональных схем наблюдательных станций и применения, наиболее оптимальных в данных условиях методов измерений и точных современных геодезических приборов. При проектировании наблюдательных станций необходимо учитывать условия местности для выполнения многоразовых наблюдений.

Исследованиями установлено, что горизонтальные смещения пунктов первой группы, расположенных на водораздельном плато участка “Сокол” составили за период наблюдений в среднем 18, пунктов на подпорной стене – до 6,5, пунктов второй группы – 50 мм. Из этого следует, что все пункты второй группы (102 – 127) находятся в зоне активных оползневых смещений. Величины горизонтальных смещений пунктов второй группы значительно превышают смещения пунктов на подпорной стене. Это указывает на то, что некоторая часть оползневого тела напоздает на нижележащие слои и со временем, достигнув подпорной стены, которая является противооползневым сооружением не жестким, а податливым, может ее опрокинуть, что весьма опасно для устойчивости склона, который она удерживает.

Проведенные исследования горизонтальных и вертикальных смещений на участке “Сирко” указывают на то, что на большей части склона за период наблюдений деформаций не произошло, т. е. выполненные противооползневые мероприятия приостановили образование оползневых подвижек в зоне происшедшего оползня. Горизонтальные смещения пунктов первой группы не превысили 15 мм, а пунктов, расположенных на склоне, – 2.

3. ГЕОМЕТРИЗАЦИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ

3.1. Геометризация параметров оползневой процесса во взаимосвязи с инженерно-геологическим строением склона

Геометризация месторождения – совокупность полевых наблюдений, измерений, вычислений и графических построений, проводимых с целью геометрического изображения форм залежей месторождений полезных ископаемых, условий их залегания, пространственного распределения свойств полезных ископаемых и процессов, происходящих в недрах.

Представление параметров оползневых процессов в виде таблиц и текстовых пояснений затрудняет их анализ и исследования. Намного удобнее применять графические изображения, которые позволяют обобщить полученные данные о развитии и образовании оползневой процесса в пространстве и во времени. Поэтому использование в этом направлении **горной геометрии** – науки о геометрическом моделировании формы залежи, свойств (качества) полезных ископаемых и процессов, происходящих в недрах, – дает возможность детально изучить строение естественных склонов, уступов карьеров и, следовательно, делать более достоверные прогнозы относительно развития оползневых процессов [69, 70, 71]. Для выявления наиболее активных зон выполнена геометризация кинематической модели в виде графических изображений инженерно-геологических элементов строения склона во взаимосвязи с кинематическими характеристиками оползневых смещений. Графические изображения геометризации включают в частности планы гипсометрические, изомощностей, изоглубин, динамические, а также, объёмные графики и модели.

Динамические планы изображают изменение параметров оползневых процессов во времени. Особый интерес представляют планы распределения скоростей смещений в различных точках оползня и изменение этих скоростей во времени.

Гипсометрические планы, на которых поверхность месторождения, условия залегания водоносных и водоупорных горизонтов, тектонические нарушения и т. д. изображены изогипсами (горизонталями).

Планы изомощностей представляют изменение мощности пород оползневой тела, а планы изоглубин – глубину залегания породы в любой точке.

Геометризация кинематической модели оползневой склона позволяет определить наиболее интенсивные участки развития оползневой процесса.

Все графические построения выполнялись в программе Surfer.

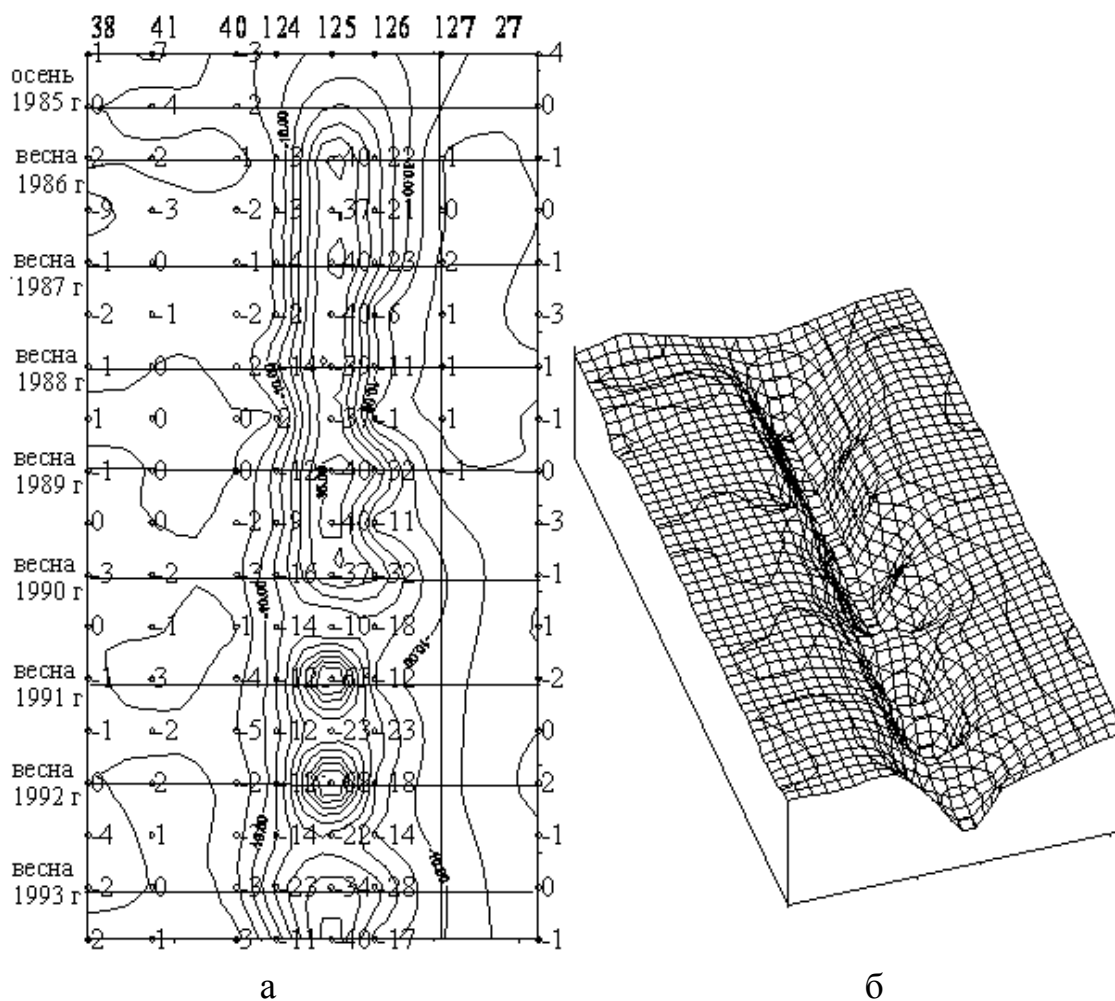
3.1.1. Пространственно-временные графики равных осадков

Одним из путей изучения динамики оползневой процесса есть динамические планы параметров кинематических характеристик оползневых смещений на определенный период наблюдений в пространстве и во времени. Построение

динамических планов выполнялось методом компьютерного моделирования на основе результатов инструментальных наблюдений в программе Surfer.

Пространственно-временные графики равных осадок, в отличие от традиционных линейных, дают подробную картину о характере деформации поверхности склона и возможность определения потенциально-опасных оползневых участков. Построение пространственно-временных графиков выполняется в следующей последовательности: в выбранном масштабе по вертикальной линии откладываются даты наблюдений, по горизонтальной – расстояния между точками профильной линии. На пересечении этих линий находятся точки и их величины оседаний на определенный период времени наблюдений.

Такие графические изображения показывают наглядную картину динамики земной поверхности в виде осадок или поднятий. Для удобства чтения пространственно-временных графиков необходимо учитывать, что изолинии, параллельные вертикали (рис. 3.1), свидетельствуют об общем наклоне участка в ту или иную сторону, т. е. о неравномерной осадке поверхности склона, а изолинии, параллельные горизонтали, указывают на равномерное оседание склона (рис. 3.2).



Сечение изолиний через 5 мм

Рис. 3.1. Пространственно-временный график равных осадок (а) и их модель (б) застроенного и укрепленного склона, участок “Сокол”

На участке “Сирко” в отличие от участка “Сокол” деформация поверхности склона происходит равномерно. На пунктах первой группы явных осадок не наблюдается. Все изменения находятся в пределах точности измерений, подтверждением этому является изображение изолиний на пространственно-временных графиках по профильной линии № 15 (рис. 3.2).

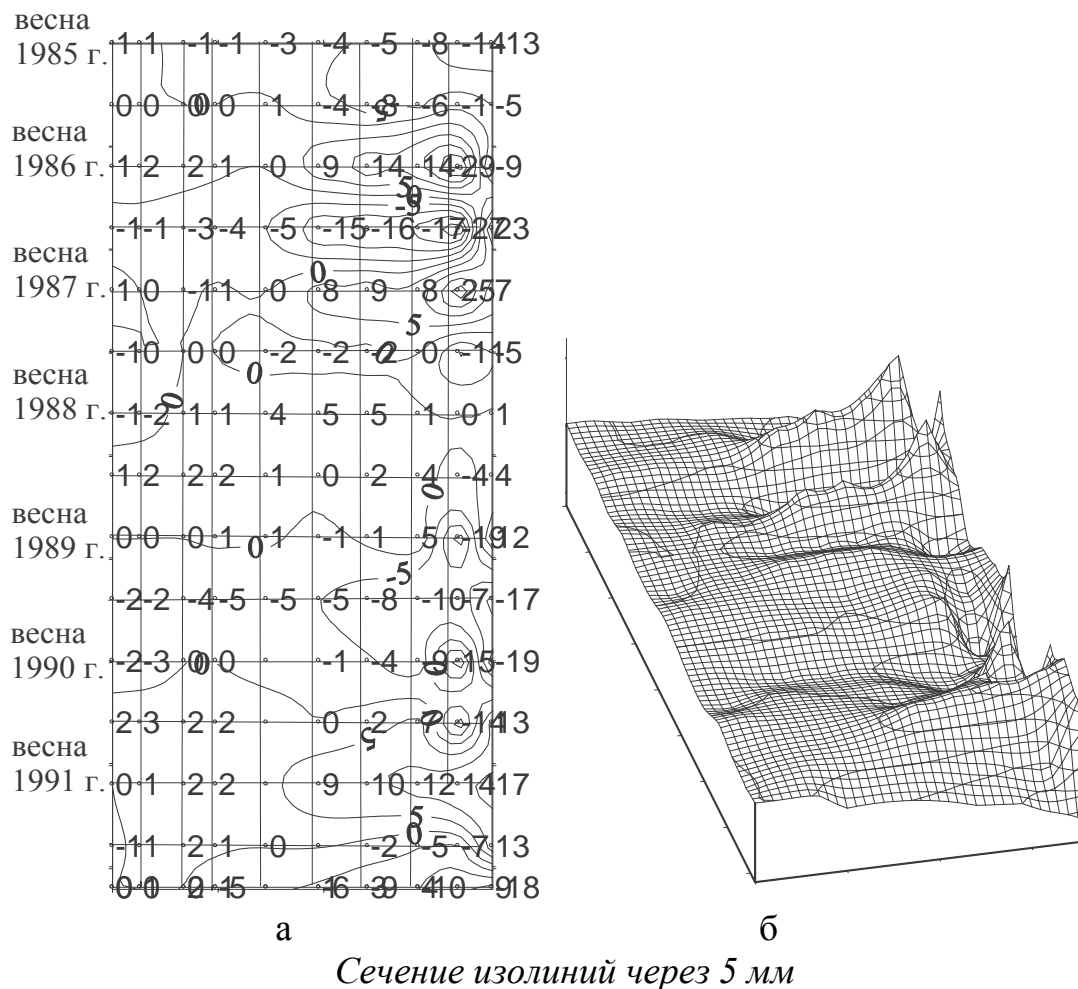


Рис. 3.2. Пространственно-временной график равных осадок(а) и их модель (б) по линии № 15, участок “Сирко”

Средняя величина вертикальных смещений (оседаний) пунктов первой группы за период наблюдений с 1984 по 1998 год составила 17,5 мм за исключением пунктов 18 и 1, расположенных в зоне происшедшего оползня, где зафиксированы смещения 44 и 101 мм соответственно.

Столь незначительная деформация верхней части застроенного склона указывает на эффективность выполненных противооползневых мероприятий по урегулированию поверхностного стока вод, террасированию склона с закреплением его поверхности кустарниковой растительностью, а также и дренажа.

Таким образом, временно-пространственные графики равных осадок и их блок-диаграммы дают наглядную картину о распределении деформаций за определенный период наблюдений, чего нельзя показать на других графиках или планах.

3.1.2. Планы распределения скоростей оползневого процесса

На участке, где подошва склона упирается в подпорную стену, наблюдается незначительное поднятие земной поверхности и оседание (пункты 101, 102, 103) с наименьшей скоростью, при этом вертикальные смещения возникают со знаком плюс. Незначительный подъем происходит за счет пополнения поверхности наползающими массами с верха склона и накопления их перед подпорной стеной, которая выполняет удерживающую роль сооружения.

Средняя скорость оседания пунктов первой группы в зоне высотной застройки на участке “Сокол” за период наблюдений не превышала 2,1 мм/мес, между тем наибольшая скорость оседания пунктов второй группы в районе средней части склона в среднем составила 4,3.

Планы распределения средней скорости оползневых смещений в изолиниях дают возможность определять скорость в любой точке склона и устанавливать места с интенсивным развитием оползня. Это позволяет спрогнозировать дальнейшее развитие деформации склона.

Между грунтовыми марками 112, 125 – 126 оседания земной поверхности изменяется от 10 до 50 мм между циклами “ весна – осень”. В районе пунктов второй группы 122, 119 и 116 оседание поверхности склона неравномерное, волнообразное и колеблется в пределах 20, 10 и 20 мм. Планы скорости оседания пунктов на оползневом участке “Сокол” склона балки Евпаторийской за 1986 и 1992 годы представлены на рис. 3.3 и 3.4.

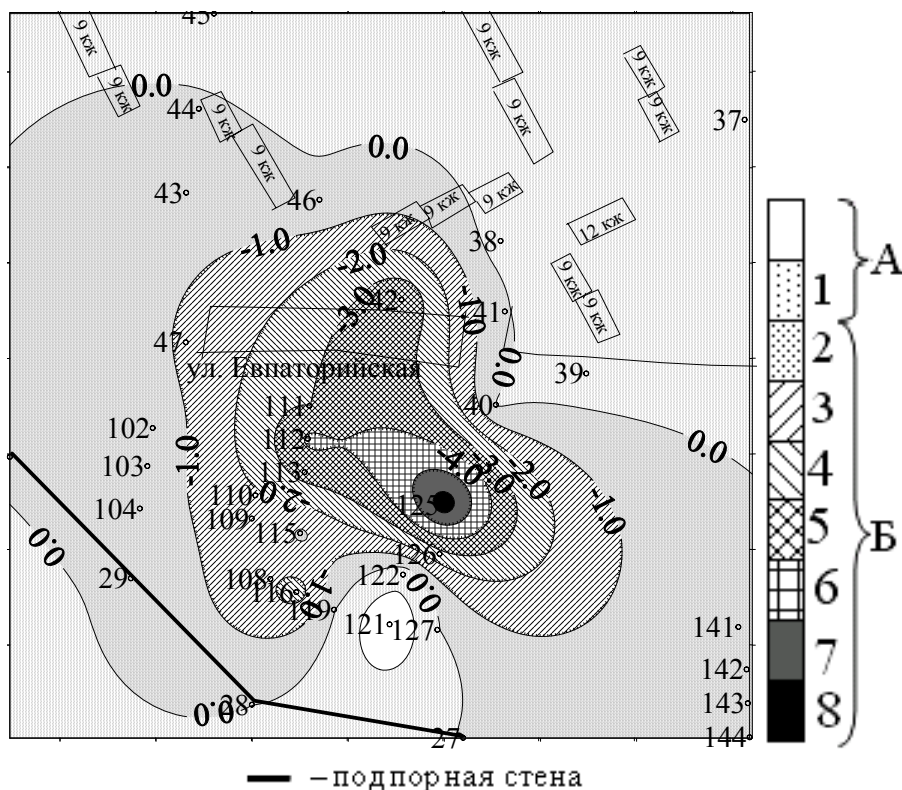


Рис. 3.3. План распределения скорости оседаний пунктов во времени за 1986 год (мм/мес): А – подъем: 1 – 0...1; Б – оседание: 2 – 0...1; 3 – 1...2; 4 – 2...3; 5 – 3...4; 6 – 4...5; 7 – 5...6; 8 – 6...7, участок “Сокол”

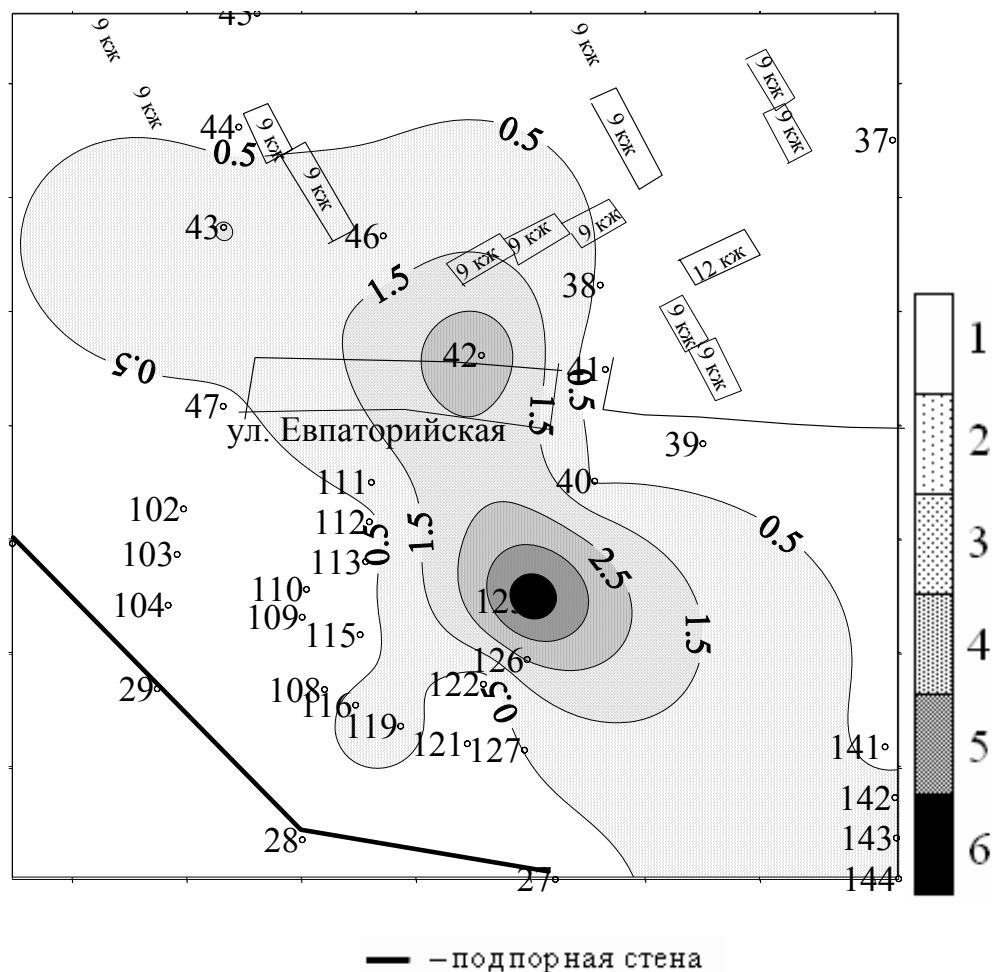


Рис. 3.4. План распределения скорости оседаний пунктов во времени за 1992 год (мм/мес): 1 – 0...0,5; 2 – 0,5...1,5; 3 – 1,5...2,5; 4 – 2,5...3,5; 5 – 3,5...4,5; 6 – 4,5...5,5, участок “Сокол”

Максимальная средняя скорость горизонтальных смещений средней и нижней частей склона (пункты 112 – 118, 121, 122, 125 – 127) на участке “Сокол” за 1987 и 1992 годы составила 9 мм/мес (рис. 3.5, 3.6).

Динамические планы распределения суммарных горизонтальных смещений пунктов за определенный промежуток времени дают достаточно наглядное представление о размерах и направлении движения оползневого тела, а также возможность обозначать границы предполагаемого оползневого процесса (рис. 3.7).

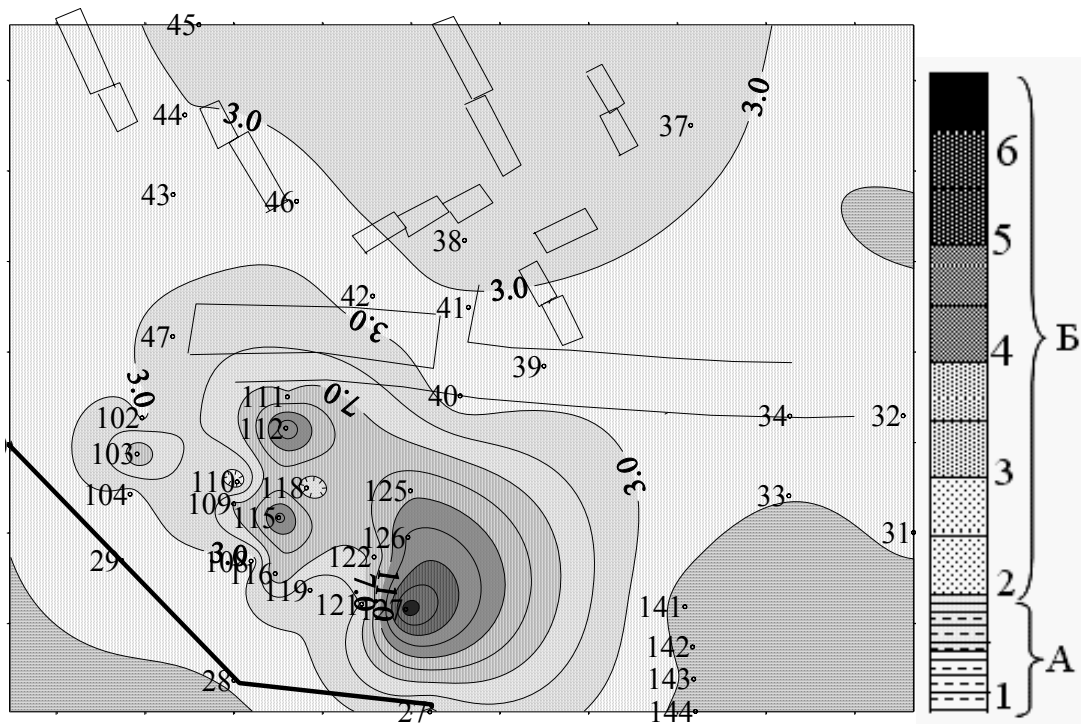


Рис. 3.5. План распределения скорости горизонтальных смещений пунктов во времени за 1987 год (мм/мес): А – сжатие: 1 – 1...1; Б – растяжение: 2 – 1...3; 3 – 3...7; 4 – 7...11; 5 – 11...15; 6 – 15...19, участок “Сокол”

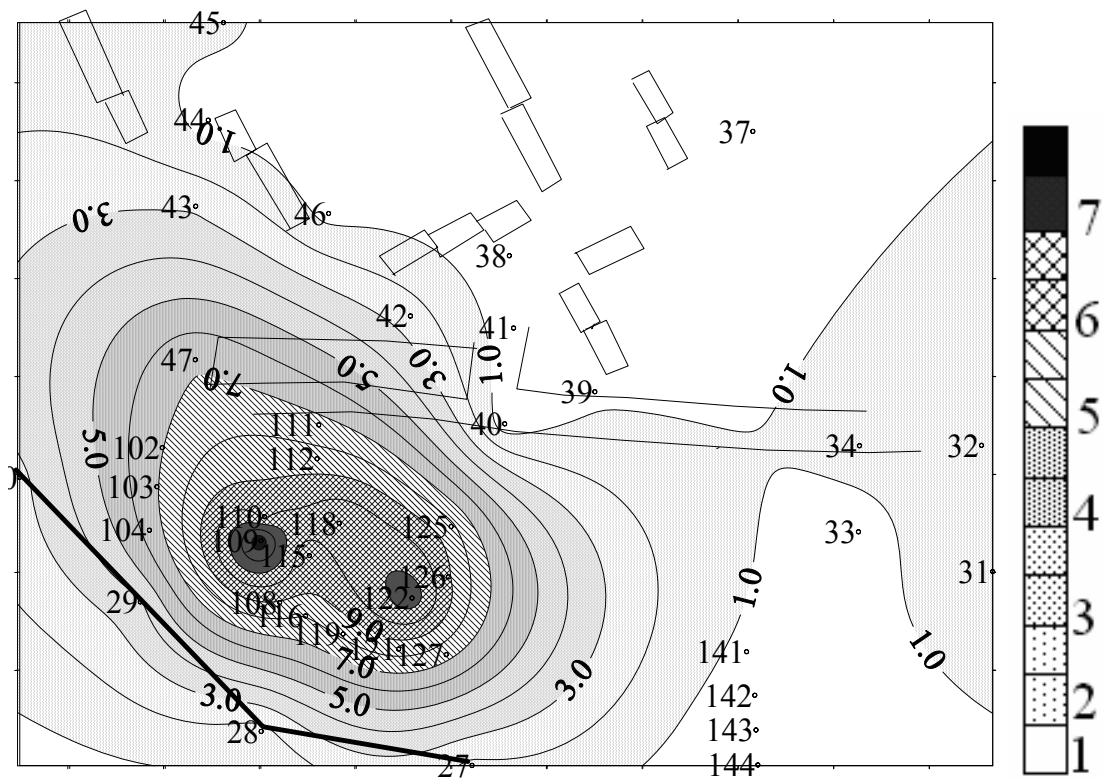
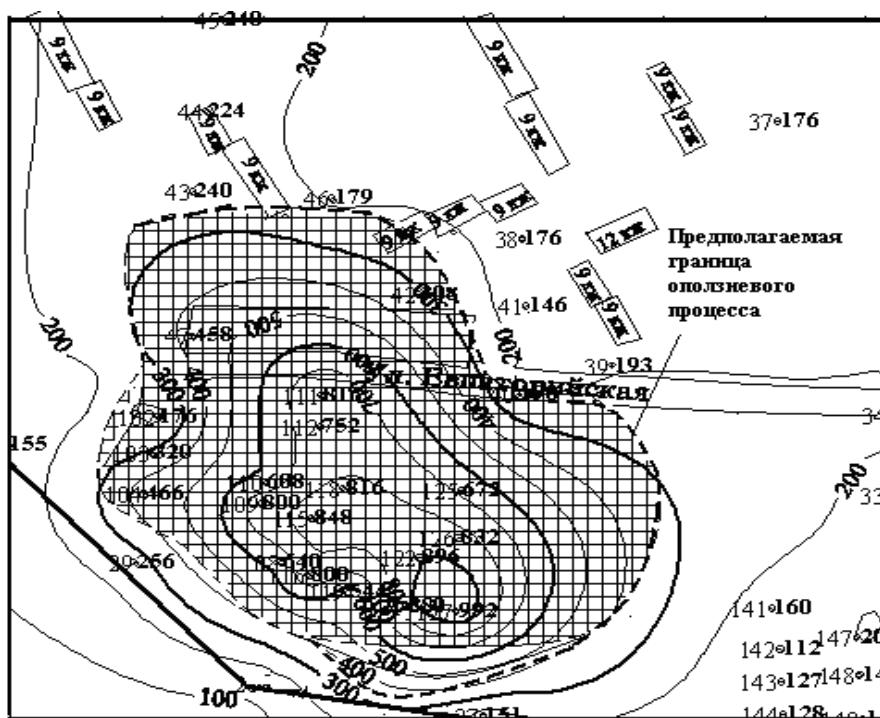
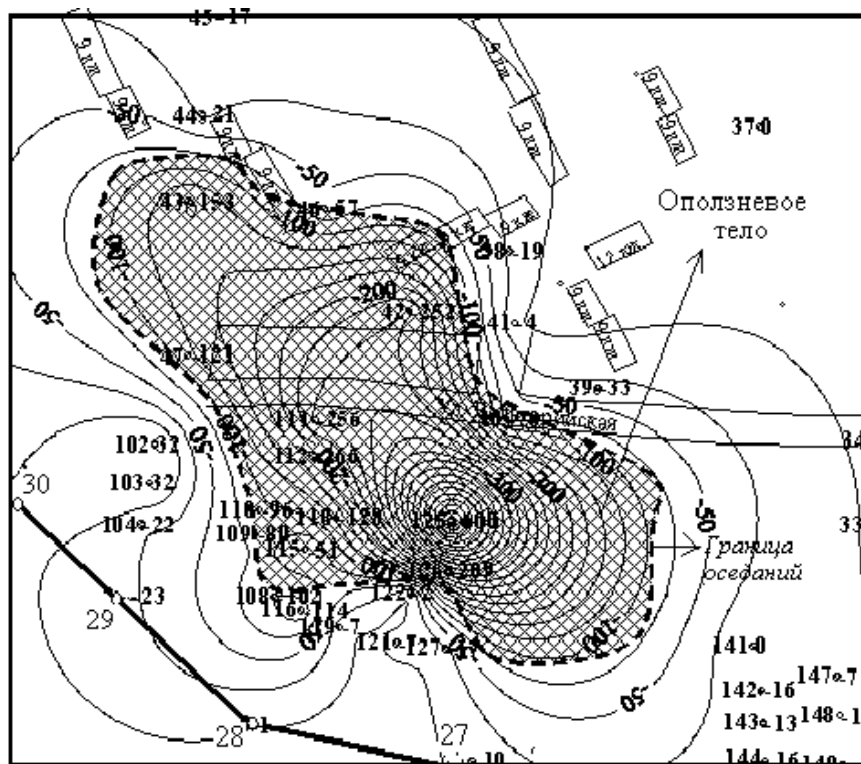


Рис. 3.6. План распределения скорости горизонтальных смещений пунктов во времени за 1992 год (мм/мес): 1 – 0...1; 2 – 1...3; 3 – 3...5; 4 – 5...7; 5 – 7...9; 6 – 9...11; 7 – 11...13, участок “Сокол”



а



б



— площадь предполагаемого оползневой массы;
— подпорная стена

Рис. 3.7. Планы распределения горизонтальных (а) и вертикальных (б) суммарных смещений на участке “Сокол” за 1985 – 1992 годы

Изображение смещений на динамических планах оползневой участка “Сирко” подтверждают, что видимых изменений устойчивости склона балки

Красноповстанческой не обнаружено (рис. 3.8 – 3.11). Все изменения находятся в пределах точности уравнивания.

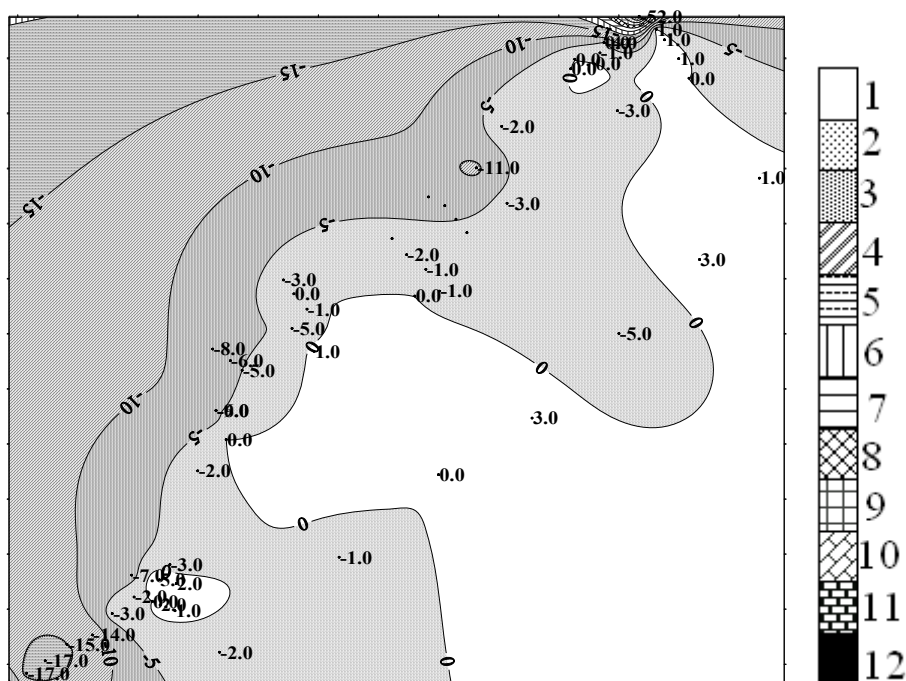


Рис. 3.8. План распределения скорости оседаний пунктов за 1986 год, (мм/мес): 1 – 0...5; 2 – 5...10; 3 – 10...15; 4 – 15...20; 5 – 20...25; 6 – 25...30; 7 – 30...35; 8 – 35...40; 9 – 40...45; 10 – 45...50; 11 – 50...55, участок “Сирко”

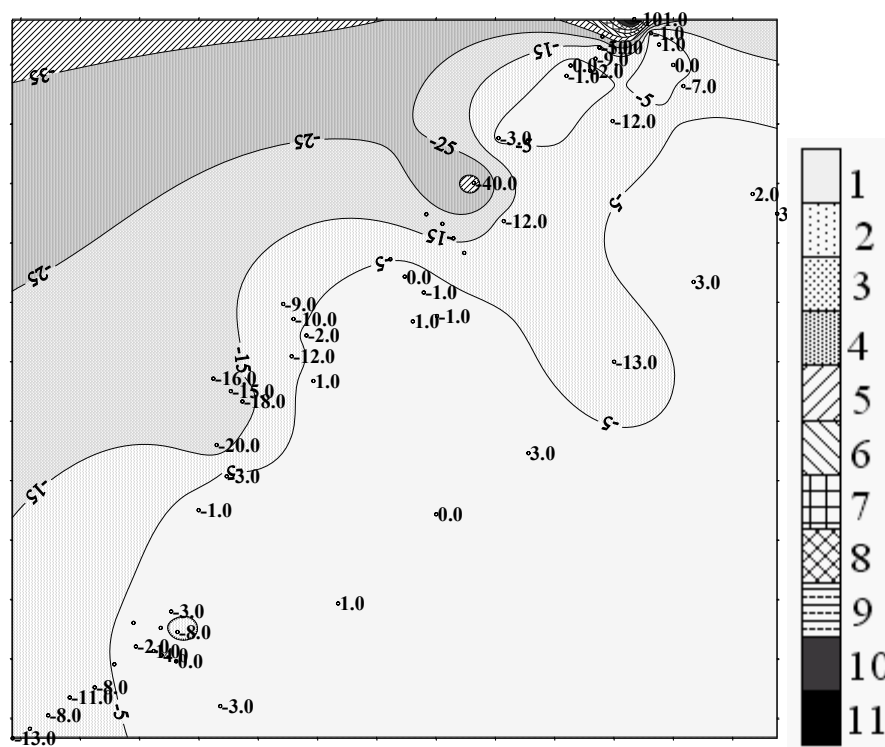


Рис. 3.9. План распределения скорости оседаний пунктов за 1992 год, (мм/мес): 1 – 0...5; 2 – 5...15; 3 – 15...25; 4 – 25...35; 5 – 35...45; 6 – 45...55; 7 – 55...65; 8 – 65...75; 9 – 75...85; 10 – 85...95; 11 – 95...105, участок “Сирко”

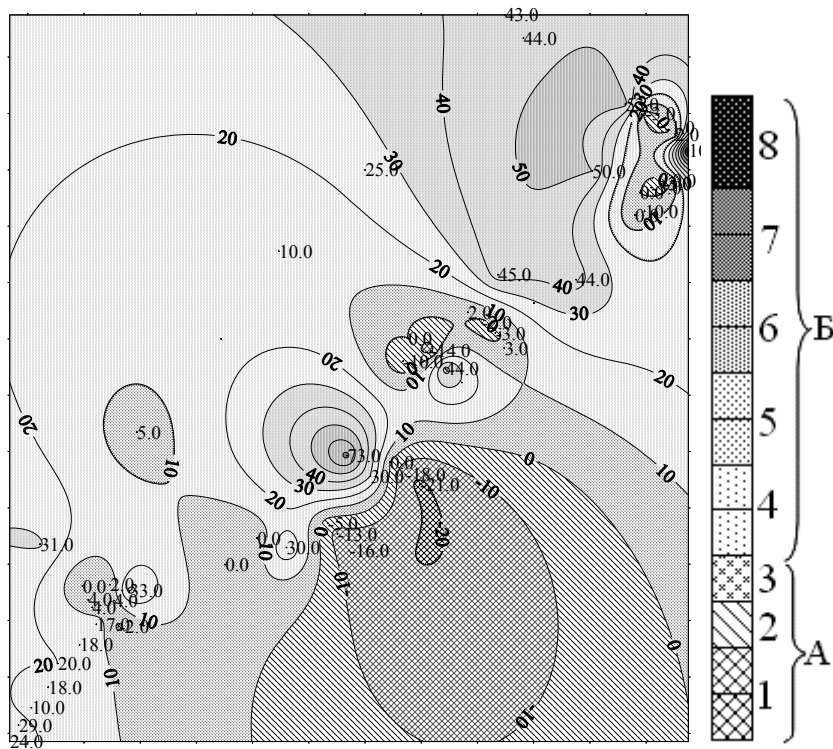


Рис. 3.10. План распределения скорости горизонтальных смещений пунктов во времени за 1986 год (мм/мес): А – сжатие: 1 – 30...10; 2 – 10...0; Б – растяжение: 3 – 0...10; 4 – 10...30; 5 – 30...50; 6 – 50...70; 7 – 70...90; 8 – 90...110, участок “Сирко”

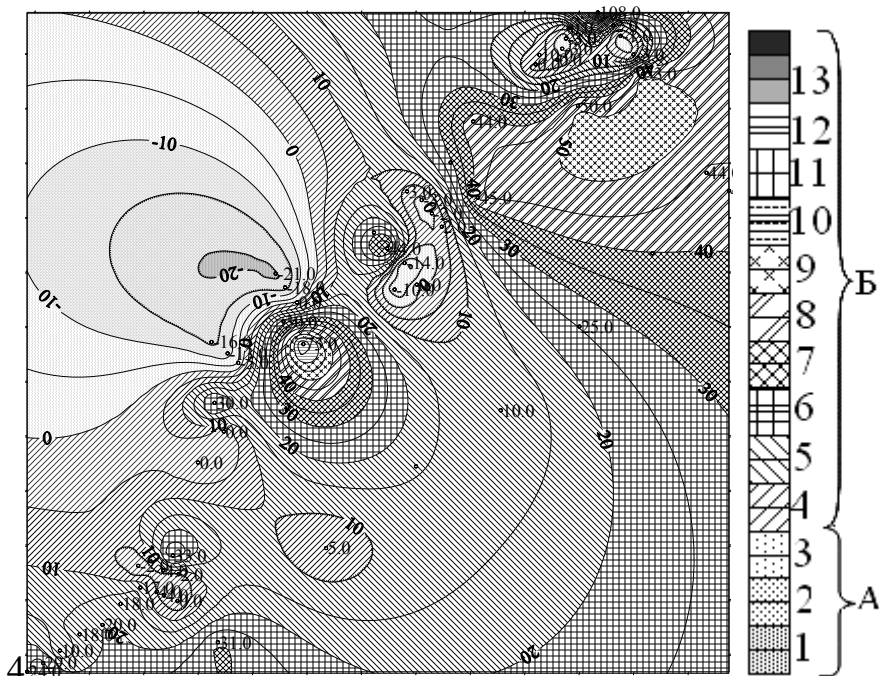


Рис. 3.11. План распределения скорости горизонтальных смещений пунктов во времени за 1986 год (мм/мес): А – сжатие: 1 – 30 ÷ 20; 2 – 20 ÷ 10; 3 – 10 ÷ 0; Б – растяжение: 4 – 0...10; 5 – 10...20; 6 – 20...30; 7 – 30...40; 8 – 40...50, 9 – 50...60; 10 – 60...70; 11 – 70...80; 12 – 80...90; 13 – 90...100, участок “Сирко”

Таким образом, на основании полученных скоростей наблюдательных пунктов следует, что скорости смещений оползневых склонов на участках “Сокол” и “Сирко” в соответствии со шкалой скоростей Е.П. Емельяновой относятся к медленным и очень медленным скоростям [6].

3.1.3. Гипсометрические планы геометрических параметров строения склонов

Массив участка “Сокол” оползневого склона балки Евпаторийской сложен лессовидными породами с прослойками глины. Кровля водоупорного слоя постепенно погружается в юго-западном направлении, в сторону тальвега балки. Заложение между изолиниями кровли водоупорного слоя изменяется на верхней части склона и средней от 10,0 до 2,5 м, соответственно.

Продольные профили инженерно-геологических элементов строения склона, учитывая характерные направления рельефа, показывают расположение водоносного горизонта относительно водоупорного слоя и поверхности склона (рис. 3.12, 3.13).

В частности, у подпорной стены (пункты 28, 29) водоупорный слой подходит к водоносному горизонту и этим объясняются наибольшее смещение этих пунктов на подпорной стене и водоток в тальвеге балки.

В юго-восточной части участка (пункты 122, 125 – 127) сближение водоносного горизонта и кровли водоупорного слоя вызывает смещение песчано-лессовой массы.



Рис. 3.12. Диаграмма геологического разреза склона балки Евпаторийской по линии 46 – 119



Рис. 3.13. Диаграмма геологического разреза склона балки Евпаторийской по линии 45 – 104

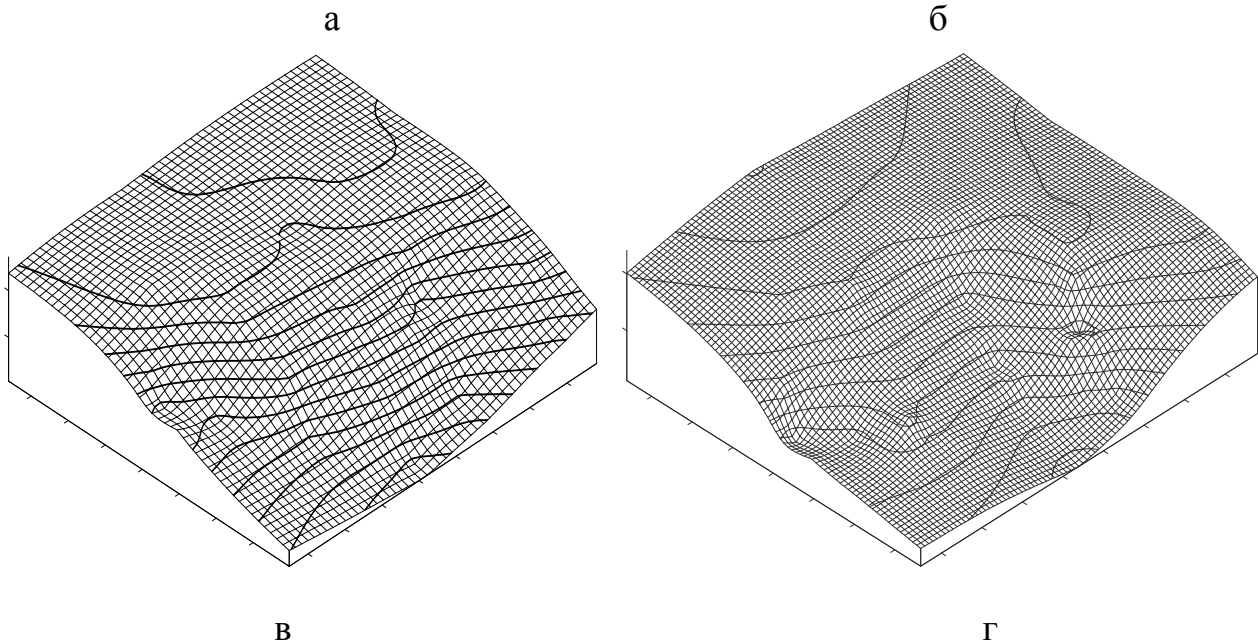
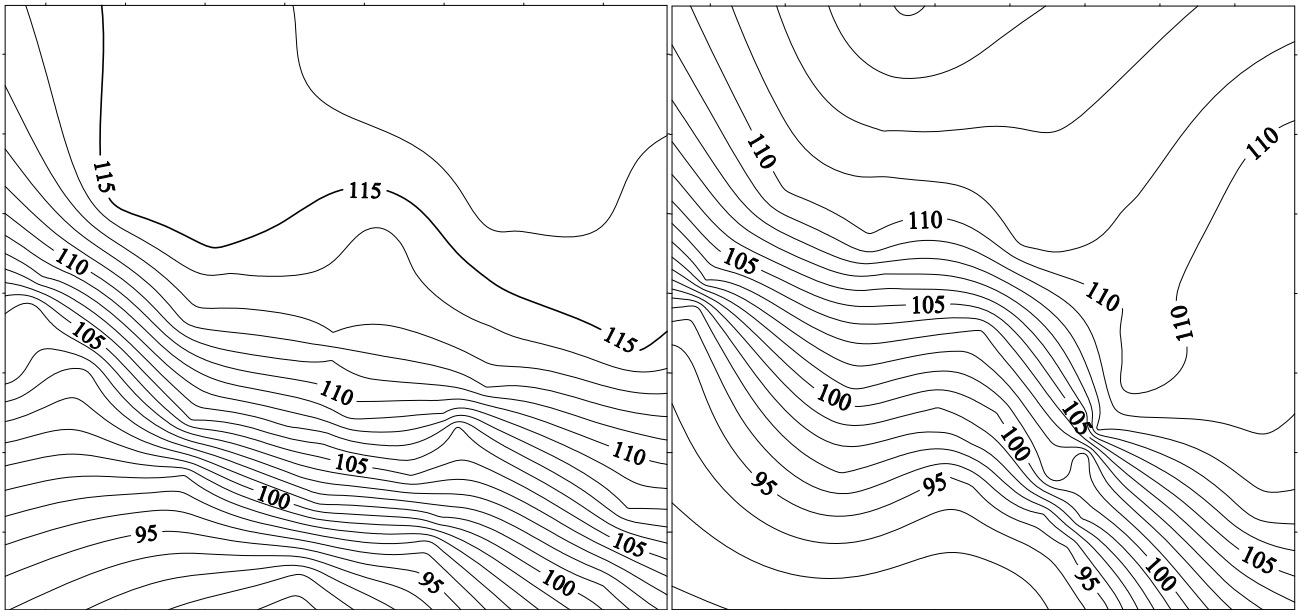
На гипсометрические планы кровли водоупорного слоя и поверхности “зеркала” водоносного горизонта по координатам наносились пункты наблюдательной станции. Для каждого пункта определялись углы наклона указанных инженерно-геологических слоев. Углы наклона водоупорного слоя на участке “Сокол” изменяются от $0,5$ до 18° (пункты 45, 125) и поверхности водоносного горизонта от 0 до 21° (пункты 43 – 45, 122). Главный уклон поверхности водоупорного слоя i_0 составляет 3 в левой части участка склона и 4° – в правой (рис. 3.14, а).

Наибольшая глубина залегания кровли водоупорного слоя в верхней части склона – $23,1$ м (пункт 45), а наименьшая – $7,96$ у подпорной стены.

Изогипсы поверхности водоносного горизонта имеют более спокойный характер, чем кровля водоупорного слоя, располагаются практически параллельно горизонталям рельефа склона. Максимальный угол наклона “зеркала” водоносного горизонта равен $18,4^{\circ}$ и находится в нижней части склона, на водораздельном плато, где расположены пункты первой группы 0 (рис. 3.14, б).

Изучение структуры и морфологии оползневого тела выполняется на гипсометрическом плане совмещенных поверхностей склона и изоглубин, а также мощности пород оползневого тела до поверхности скольжения.

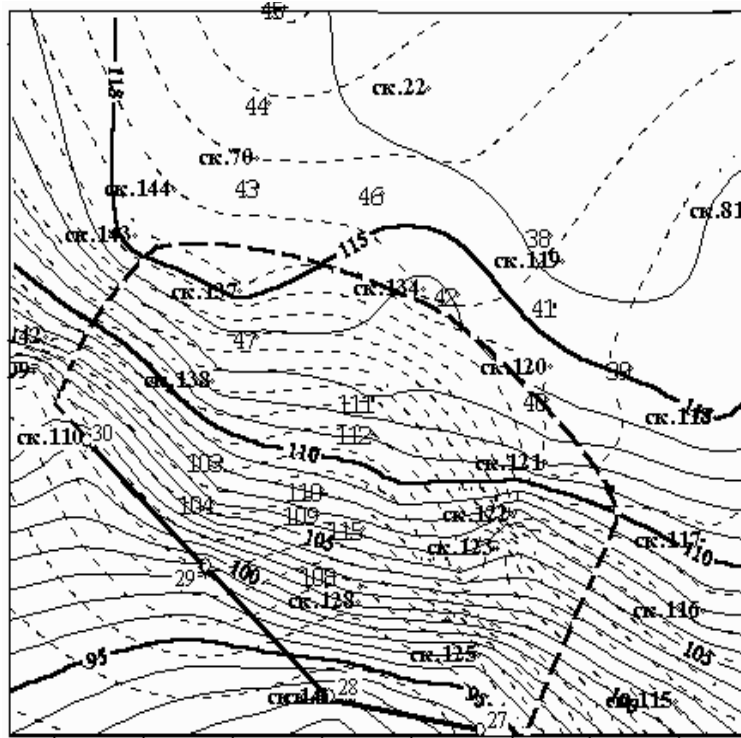
Предполагаемое направление движения оползневого тела определяется по гипсометрическому плану кровли водоупорного слоя и поверхности водоносного горизонта. В местах совпадения изогипс водоупорного слоя и водоносного горизонта происходят наибольшие смещения поверхности склона (рис. 3.15).



Сечение изолиний через 1 м

Рис. 3.14. Гипсометрические планы и цифровые модели залежей: поверхности водоносного горизонта (а, в) и кровли водоупорного слоя (б, г)

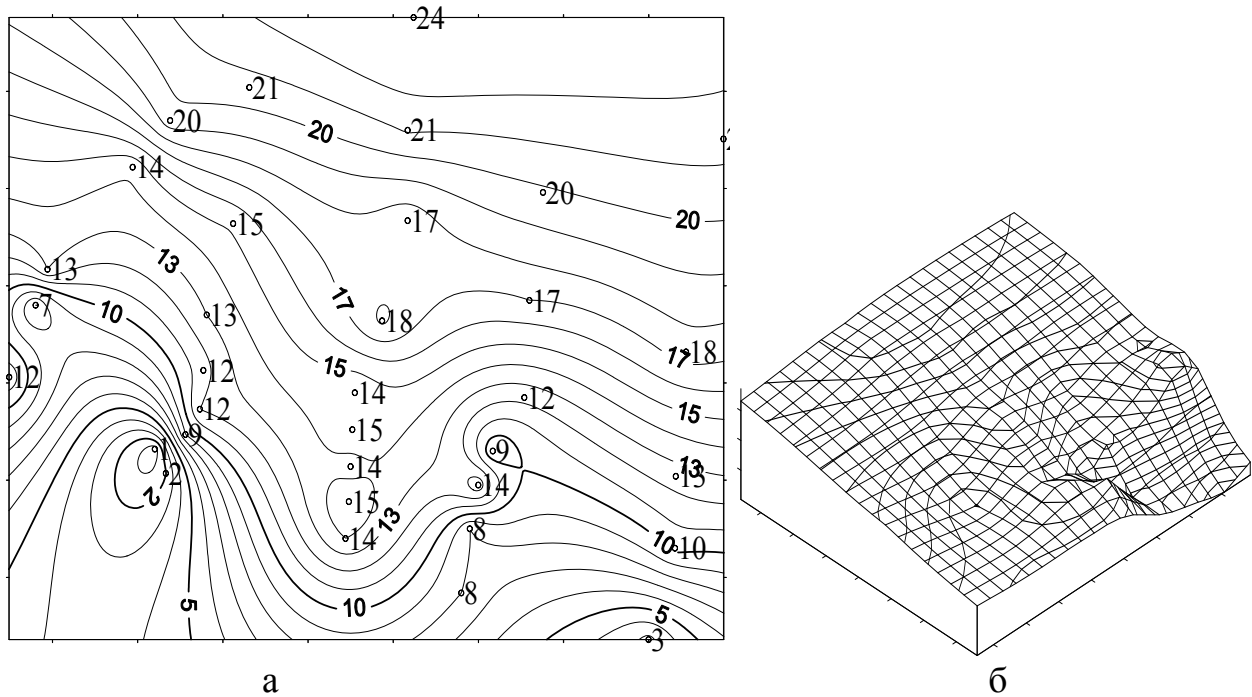
Путем вычитания из высоты поверхности рельефа глубины кровли водоупорного слоя, получен план поверхности изомощности оползневого тела, максимальная мощность которого находится на водораздельном плато в верхней части склона и составляет 23,5 м, а минимальная – в нижней части и составляет 4,9. В центральной части участка, мощность оползневого тела изменяется сравнительно равномерно по линии пунктов 111 – 116, 119. По направлению к тальвегу балки в районе пунктов 125, 126, 121 мощность изменяется волнообразно 17–18 – 14 – 15 – 8 м, что указывает на гребни ранее происшедшего на участке “Сокол” оползня (рис. 3.16).



- изолинии кровли водоупорного слоя;
- изолинии поверхности водоносного горизонта;
- граница предполагаемой зоны оползневого процесса;
- подпорная стена

Сечение изолиний через 1 м

Рис. 3.15. Гипсометрический план совмещенных поверхностей кровли водоупорного слоя и водоносного горизонта



Сечение изолиний через 1 м

Рис. 3.16. Гипсометрический план и цифровая модель изомощности оползневого тела (а, б), участок “Сокол”

На участке “Сирко”, приуроченному к склону балки Красноповстанческой водоупорным слоем в нижней части склона и тальвеге балки служат каолины первичные белого и светло-серого цветов, глубина которых изменяется от 3,5 до 11,2 м. На глубине 21,0 – 35,0 м красно-бурые плотные суглинки и красно-бурые глины являются кровлей водоупорного слоя.

Уклон кровли водоупорного слоя плавный 0,02 – 0,05, направлен в сторону балки и лишь резко изменяется на самом склоне, достигая 0,12 – 0,75. Угол в верхней части склона изменяется от 1,3 до 15° и более, а в нижней равен 37°. Главный уклон кровли водоупорного слоя i_0 равен 0,045 или 2,58°.

Заложение изогипс водоносного горизонта балки выдержанное, одной величины. Уклон в верхней части и на самом склоне изменяется от 1,40 до 2,24° и от 14,2 до 18,26° соответственно.

Глубина мощности пород до водоносного горизонта на склоне балки Красноповстанческой изменяется от 14,23 до 0,5 м. Схема геологического разреза показывает, что “зеркало” поверхности водоносного горизонта на участке “Сирко” повторяет рельеф склона (рис. 3.17).

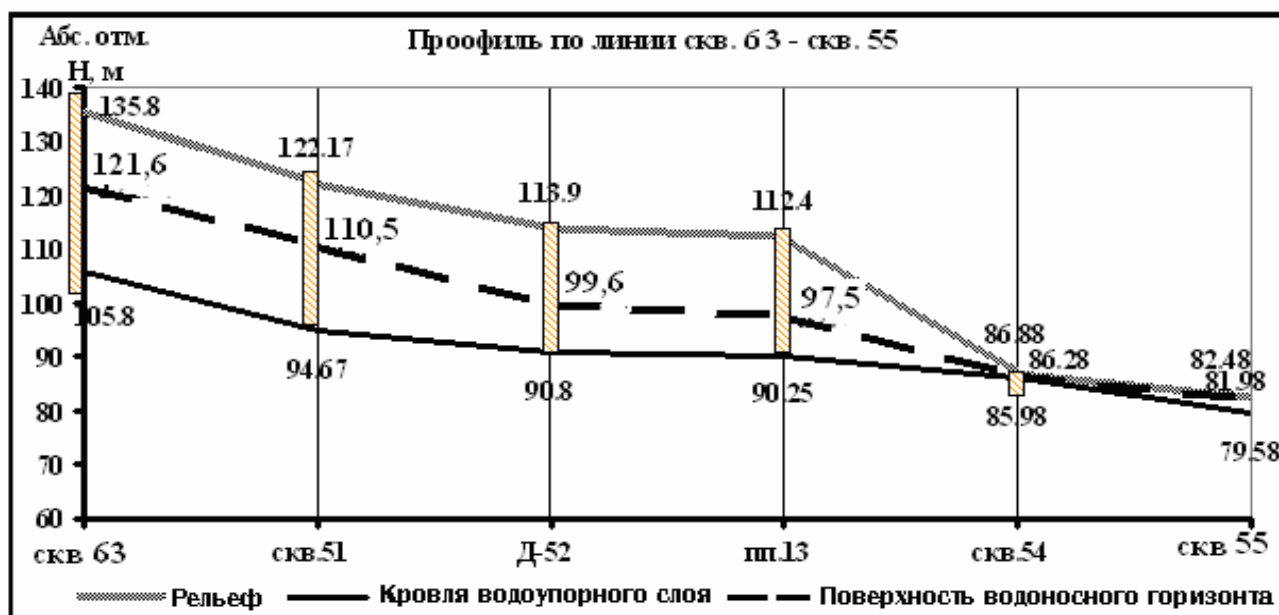
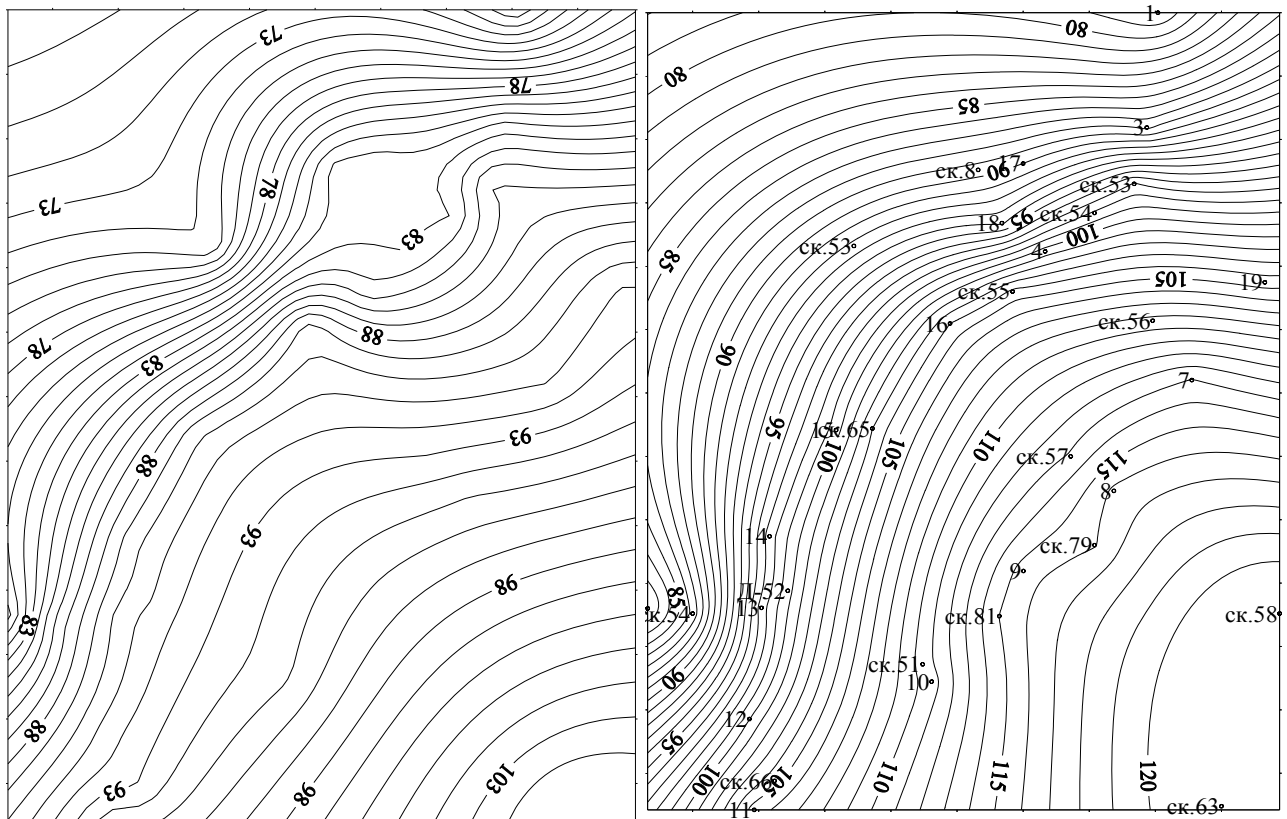


Рис. 3. 17. Схема геологического разреза склона балки Красноповстанческой на участке “Сирко”, скв 63 – 55

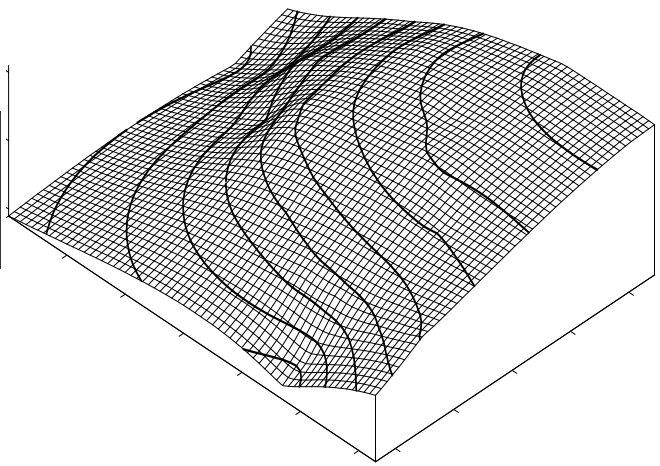
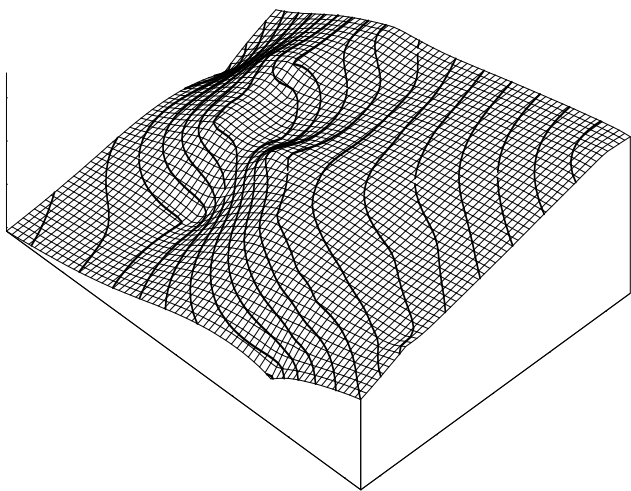
Изображения горизонталей топографической поверхности склона и изогипс поверхности изомощности оползневого тела на участке “Сирко” совпадают в средней части склона и нижней, что является благоприятным условием для возможности возникновения оползня. В верхней, юго-западной части участка изолинии пересекаются приблизительно под углами 80 – 90° (рис. 3.18).

Наибольшая мощность оползневого тела находится в районе происшедшего ранее оползня и достигает в верхней части склона 36 м, наименьшая – 1,1 зафиксирована у тальвега балки (рис. 3.19).



а

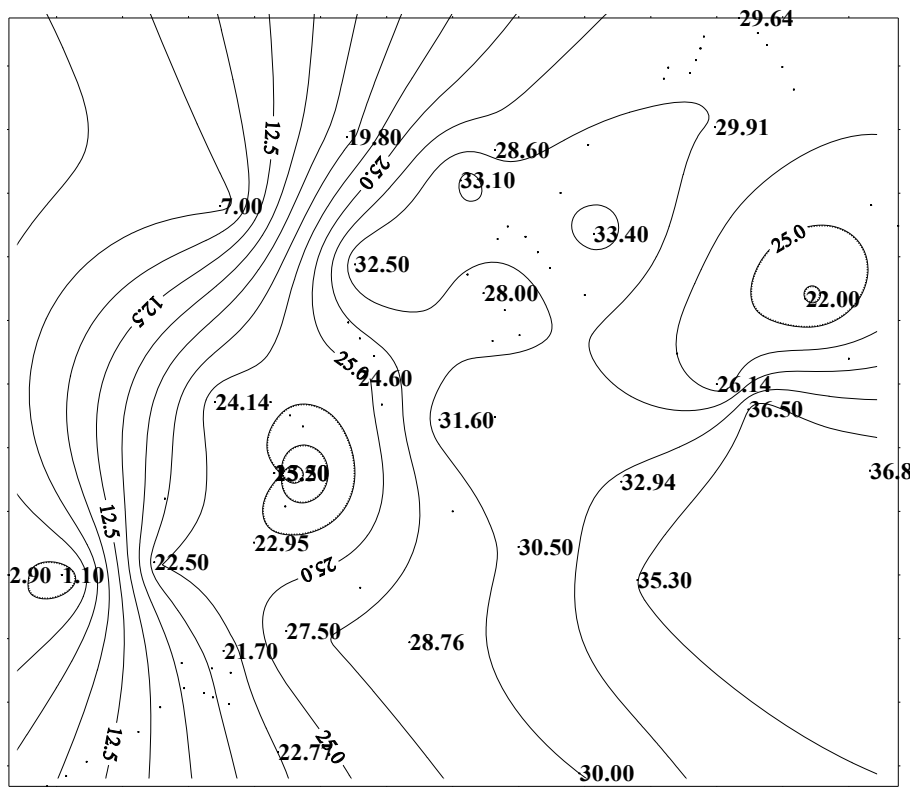
б



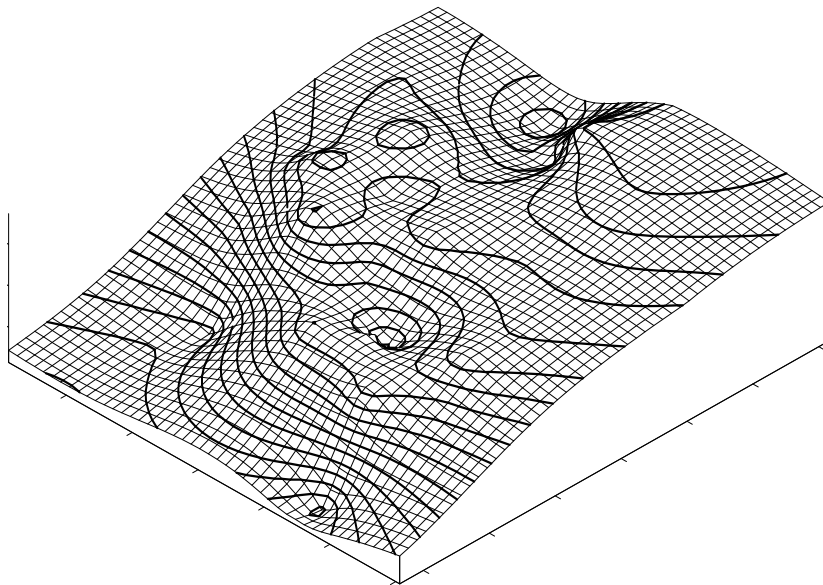
в

г

Рис. 3.18. Гипсометрические планы и цифровые модели водоупорного слоя (а, в) и водоносного горизонта (б, г), участок “Сирко”



а



б

Рис. 3.19. Гипсометрический план (а) и цифровая модель (б) изомощности оползневого тела (г), участок “Сирко”

3.1.4. Планы векторов горизонтальных смещений оползневых точек

Для определения направления горизонтальных смещений и установления взаимосвязи между смещениями точек склона и мощностью оползневого тела на

За 1992 – 1993 годы оползневые смещения имеют слабо выраженное юго-западное направление.

Из рис. 3.22 следует, что за 1996 – 2001 годы движение застроенного массива водораздельного плато (пункты 32 – 47) изменило свое направление с юго-западного на западное, в сторону неукрепленного склона. Направления смещений пунктов на подпорной стене осталось юго-западным.

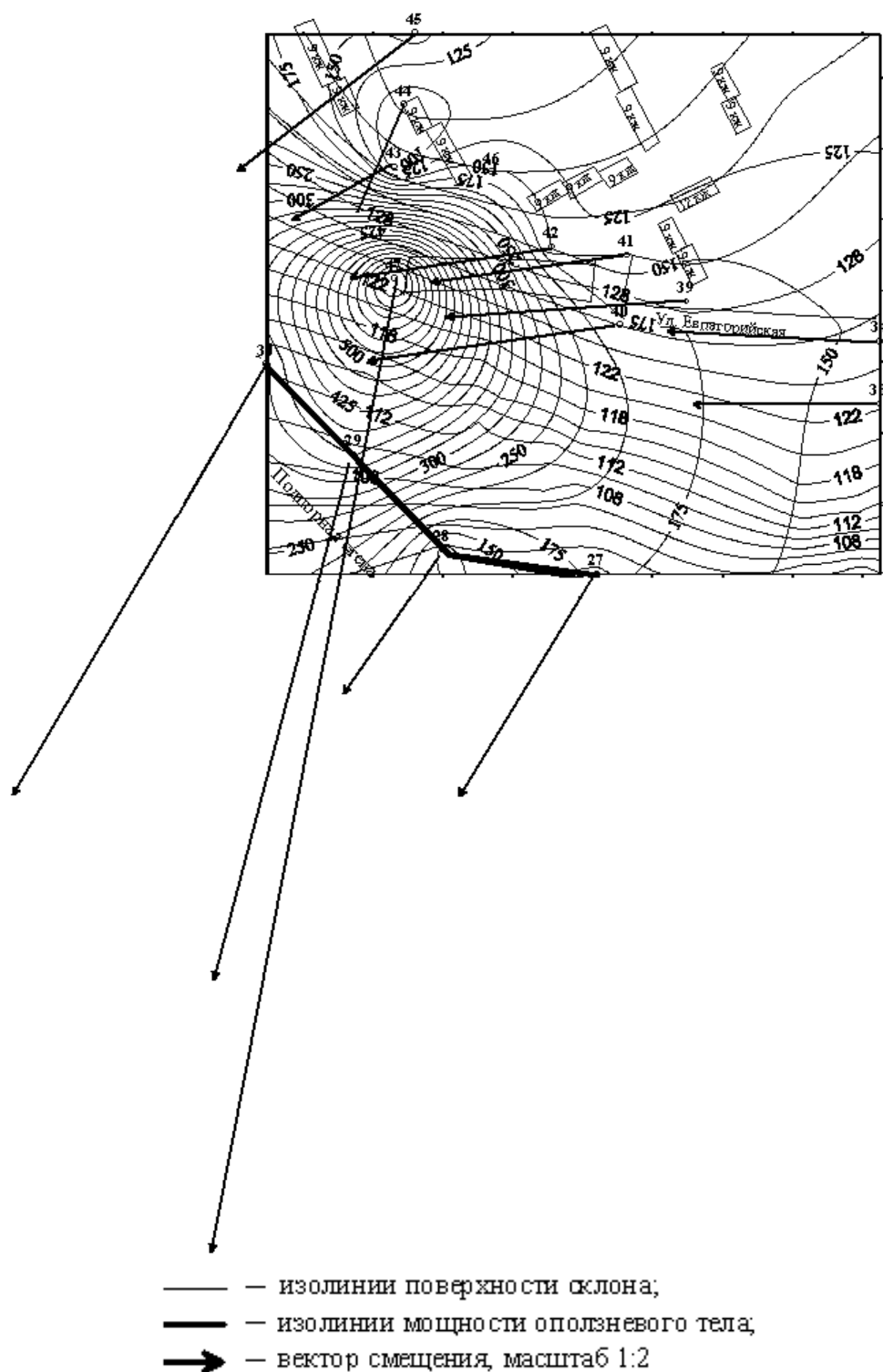


Рис. 3.22. Планы векторов оползневых смещений за 1994 – 2001 годы на участке “Сокол”

Таким образом, распределение векторов горизонтальных смещений пунктов, расположенных на водораздельном плато, на застроенной территории неравномерное, направлено параллельно западной части подпорной стены, т. е. подпорная стена пока остается укрепительным сооружением склона балки Евпаторийской (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Величины векторов смещений пунктов и их направления

Номер пункта	1984 – 1992 гг.		Номер пункта	1996 – 2001 гг.	
	ΔS_{i-1} , мм	α_{i-1} , град		ΔS_{i-1} , мм	α_{i-1} , град
Пункты на подпорной стене					
27	109	178	27	181	212
28	67	200	28	118	215
29	241	188	29	375	195
30	111	219	30	346	211
Пункты первой группы					
34	26	177	34	150	273
39	9	206	39	173	267
40	43	222	40	178	262
41	16	171	41	138	262
42	212	222	42	146	262
43	93	190	43	82	241
44	12	198	44	82	292
45	19	254	45	162	334
47	457	186	47	696	191

Для определения зависимости векторов смещений по отношению к изомощности оползневого тела удобно использовать топографический план склона в совокупности с планом изомощностей оползневого тела. На таких совмещенных планах видна картина взаимосвязи векторов горизонтальных смещений с изоглубинами толщи пород до поверхности скольжения склона. Из анализа совмещенных динамических планов векторов смещений и изомощностей следует, что увеличение мощности у подошвы склона балки связано с надвигом песчано-лёссовой массы на подпорную стену, которая до тех пор остается в данной ситуации укрепительным сооружением.

Совмещенные планы горизонтальных смещений и изомощности оползневого тела наглядно показывают зависимость векторов горизонтальных смещений от мощности оползневого тела и направления падения предполагаемой поверхности скольжения в соотношении с направлением склона.

Из анализа совмещенного гипсометрического плана изомощности оползневого тела и планов векторов горизонтальных смещений на участке “Сокол” следует, что величина смещений оползневых точек зависит от мощности пород до поверхности скольжения оползневого тела.

Изображение изогибс на гипсометрическом плане изомощности оползневого тела и величина смещений позволяют уточнять границы предполагаемого оползневого процесса и прогнозировать дальнейшее его развитие.

3.2. Исследование объема смещающихся масс на оползневом склоне

Анализ изолиний равных скоростей изомощностей на участке “Сокол” свидетельствует о том, что смещение тела оползня происходит вдоль склона по направлению к тальвегу балки и подпорной стене. После определенного периода наблюдений смещение пунктов меняет направление и проходит почти параллельно западной части подпорной стены, упираясь в восточную ее часть. Смещающаяся грунтовая масса стала набирать скорость и захватывать больше площади, подверженной оползневым смещениям, в результате чего нарушилась устойчивость подпорной стены.

Сравнивая вычисленные углы наклона векторов смещений к горизонту и наклона поверхности склона, определенного по топографическому плану, можно выделить области сползания и накопления смещающихся грунтовых масс на склоне (рис. 3.23).

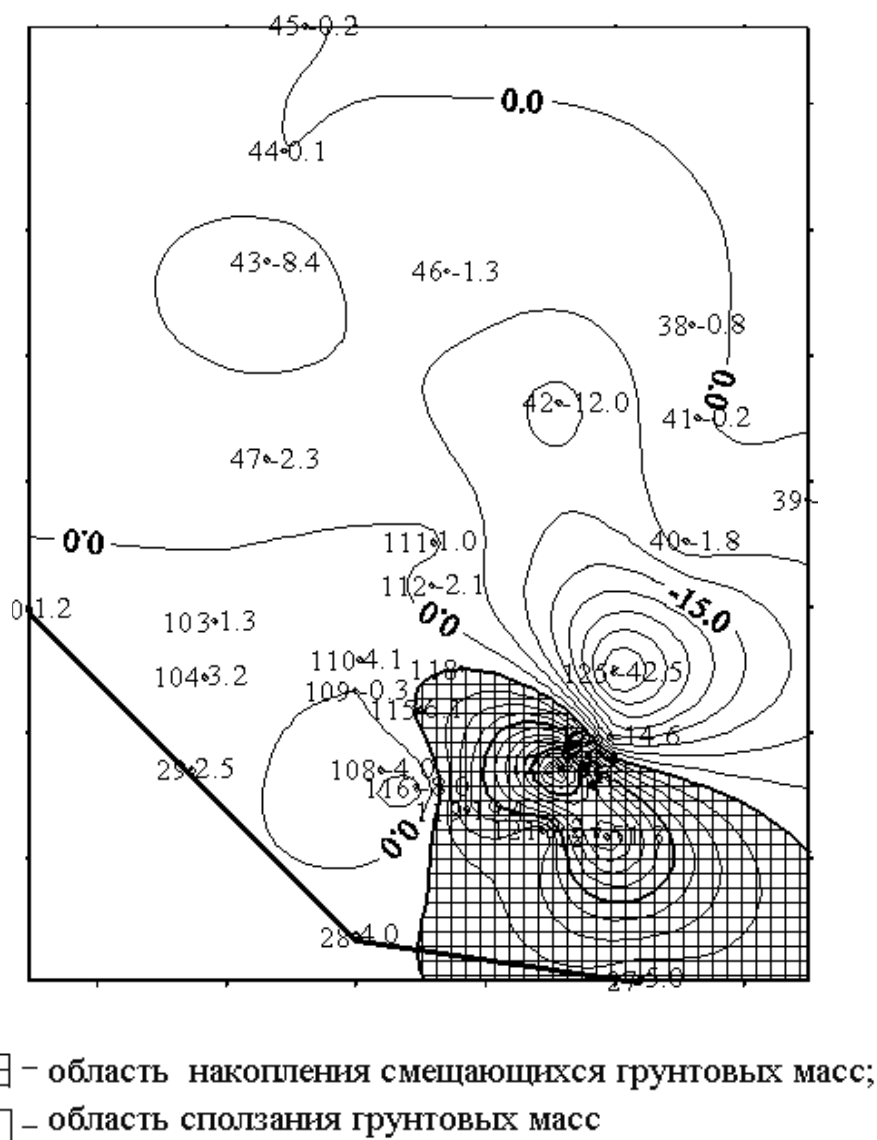


Рис. 3.23. Графическое изображение в изолиниях накопления грунтовых масс на поверхности склона и их сползания

Среднюю величину оседания поверхности склона можно вычислить по формуле

$$\Delta h = \Delta z \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \eta}{\operatorname{tg} \beta} \right),$$

где β – угол наклона вектора смещений относительно горизонта; η – угол наклона поверхности склона; Δz – вертикальные смещения.

При $\beta = \eta$ $\Delta h = 0$, т. е. поверхность склона при сползании не изменяется, при $\beta > \eta$ $\Delta h > 0$, значит, поверхность оседает (область сползания грунтовых масс), при $\beta < \eta$ $\Delta h < 0$ – поверхность склона подымается (область накопления масс) [51].

Как видно на рис. 3.23, область понижения массива находится в верхней части склона, а накопления – в нижней, у основания подпорной стены. Следовательно, возникает необходимость определения объема смещающихся пород, которые могут влиять на устойчивость склона и удерживающую способность подпорной стены. При изучении оползневого процесса важно знать, участвует ли в нем одна и та же масса оползневого тела либо в процессе развития оползня она пополняется или уменьшается новыми массами. На основании пространственного положения всех наблюдаемых точек в зоне предполагаемого оползня рассчитан объем изосмещений смещающихся грунтовых масс за определенный промежуток времени. Для наглядной картины построены графические изображения изменения объема (смещающихся масс) изосмещений оползневого склона (рис. 3.24, 3.25).

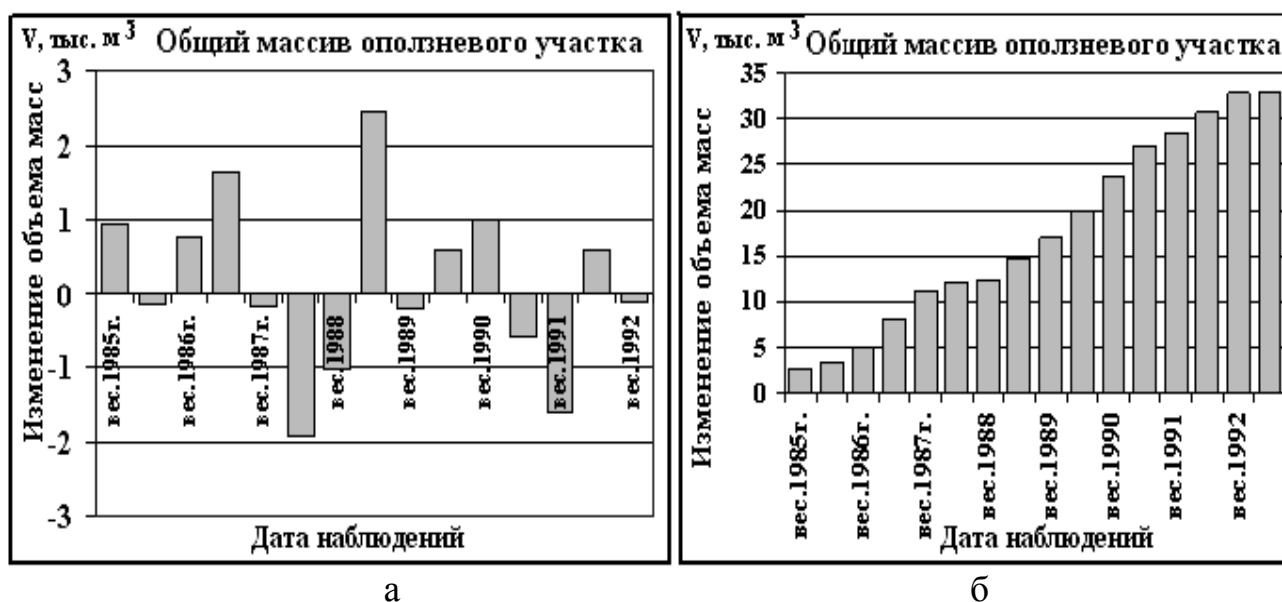


Рис. 3.24. Диаграммы изменения объема изосмещений общего массива между циклами "весна – осень" (а) и относительно начального цикла (б)

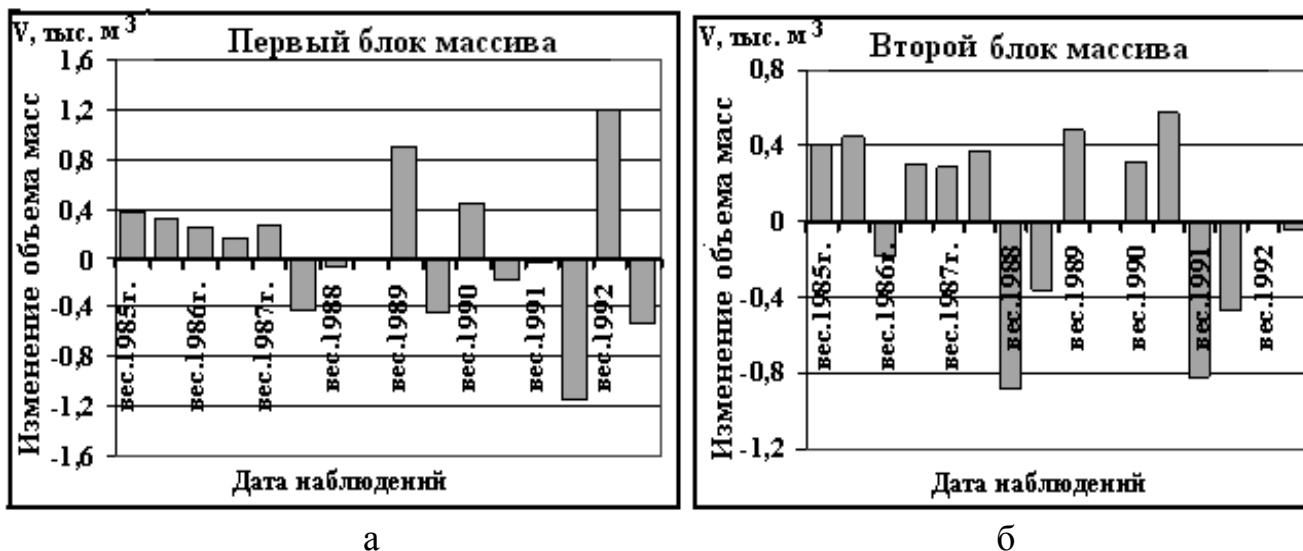


Рис. 3.25. Диаграммы изменения объема изосмещений первого (а) и второго (б) блоков между циклами "весна – осень"

Из приведенных графиков следует, что сезонные смещения оползневых масс происходят неравномерно, хотя общая тенденция относительно начального цикла показывает увеличение объема поверхностных пород в зависимости от строения склона и климатических условий.

Увеличение объема $\Delta V_{(+)}$ изосмещений верхнего блока происходит за счет площади и глубины захвата склона оползнем.

Уменьшение объема $\Delta V_{(-)}$ изосмещений – в результате эрозии основания склона, поверхностного смыва и выноса разжиженного мелкозернистого пылеватого песка из лессовой толщи в тальвег балки под основанием подпорной стены (табл. 3.2). Доказательством этому является выход вод вдоль подпорной стены и смещение тальвега к противоположному склону балки. Значения объемов показывают, что пополнение и снесение наносов почти равны между собой и этим сохраняется равновесие устойчивости верхнего склона.

$$\Delta V_{t(+)} = 2327,962 \text{ м}^3; \Delta V_{t(-)} = 2290,273 \text{ м}^3; \Delta V_t = 37,689 \text{ м}^3.$$

Сумма пополнения и уменьшения объемов наносов нижнего блока оползневого тела (средняя и нижняя части склона) между циклами составила

$$\Delta V_{t(+)} = 3556,0 \text{ м}^3; \Delta V_{t(-)} = 2895,578 \text{ м}^3; \Delta V_t = 660,422 \text{ м}^3.$$

Пополнение смещающихся масс всего массива происходит за счет поступления новых масс с участка, расположенного выше оползня и отложения наносов у основания склона (подпорной стены).

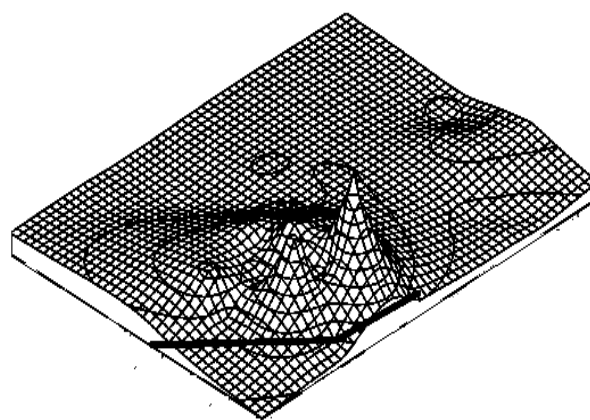
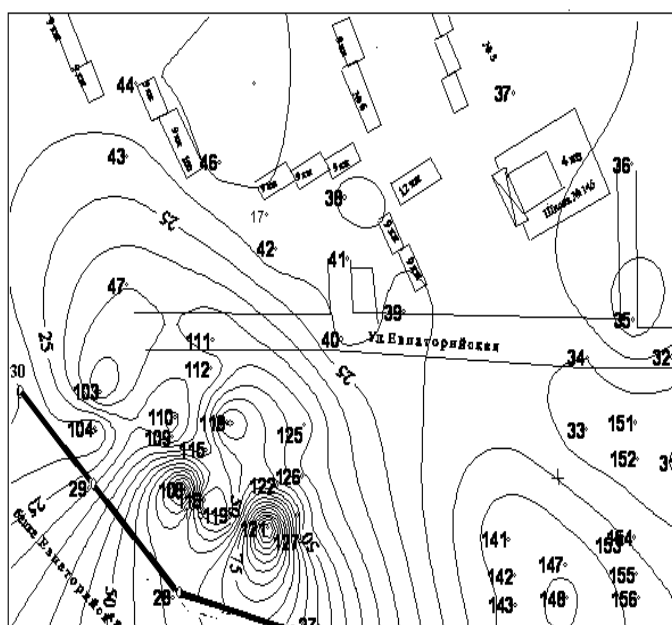
Зная объем и скорость сползающих грунтовых масс, можно правильно выбрать противооползневые сооружения, спрогнозировать их эффективность. Из табл. 3.2 следует, что изменение объема оползневого тела происходило в определенные периоды: осень 1986 г., весна 1987 г., 1989 г., весна и осень 1990 г., весна и осень 1992 г. – пополнение; весна 1986, осень 1987 и 1989 гг., весна и осень 1991 г. – уменьшение.

Таблица 3.2

Изменение объемов смещающихся оползневых масс между циклами наблюдений

Дата наблюдений	Блоки		Общий массив	Дата наблюдений	Блоки		Общий массив
	верхний	нижний			верхний	нижний	
	$\Delta V(+)$ $\Delta V(-)$	$\Delta V(+)$ $\Delta V(-)$			$\Delta V(+)$ $\Delta V(-)$	$\Delta V(+)$ $\Delta V(-)$	
05.85 г.	+	+	+	05.89 г.	+	+	+
10.85 г.	+	+	+	10.89 г.	+	-	-
05.86 г.	-	+	-	05.90 г.	+	+	+
10.86 г.	+	+	+	10.90 г.	+	-	+
05.87 г.	+	+	+	05.91 г.	-	-	-
10.87 г.	+	-	-	10.91 г.	+	-	-
05.88 г.	-	-	-	05.92 г.	+	+	+
10.88 г.	-	-	-	10.92 г.	-	-	-

Полученные планы изосмещений и блок-диаграммы дают наглядную информацию о перемещении объема масс по склону балки Евпаторийской. При помощи блок-диаграмм показаны поверхности изосмещений и их структура по вертикали во времени (рис. 3.26, 3.27).



подпорная стена

Рис. 3.26. План в изолиниях и блок-диаграмма изосмещений оползневого склона в 1985 г.

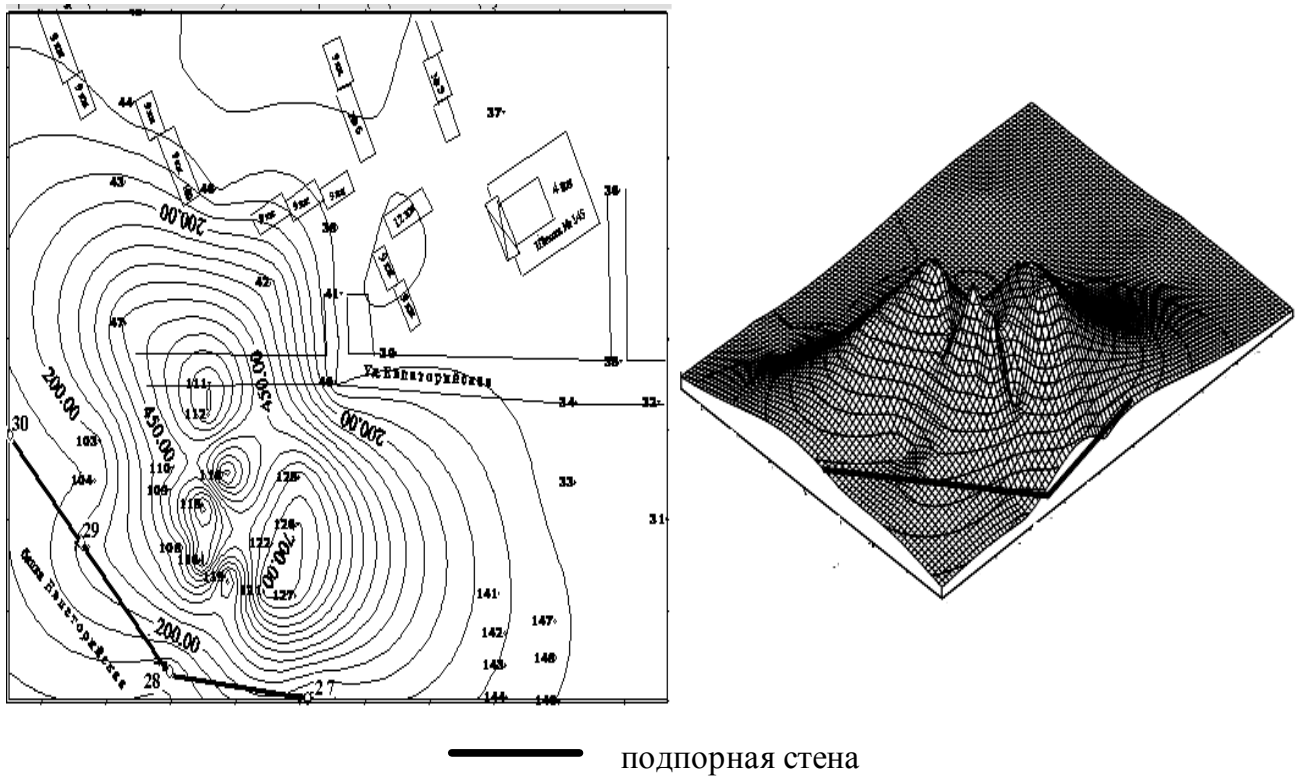


Рис. 3.27. План в изолиниях и блок-диаграмма изосмещений оползневого склона в 1994 г.

3.2.1. Методы определения объема смещающихся масс горных пород

Опасность оползней связана с динамическим воздействием смещающихся масс горных пород, которые приводят к разрушению объектов и сооружений, находящихся на теле и в зоне оползня. Большое количество существующих природных и техногенных факторов обуславливает изменение свойств горных пород, способствуя нарушению устойчивости оползневых склонов.

Для выявления начала образования и развития смещений необходима информация об исходном положении поверхности оползневого склона и ее изменение во времени.

Наиболее широко на практике применяется аппарат теории аппроксимации, позволяющий аналитически описывать поверхности. В исследовательской практике аппроксимации для аналитического описания поверхностей и для подсчета объемов тел, ограниченных этими поверхностями, используют следующие математические действия: сложение, вычитание, интегрирование и дифференцирование. Любая поверхность, изображенная в изолиниях, может быть определена как геометрическое место точек, удовлетворяющих уравнению

$$z = F(x, y) + \varepsilon,$$

где Z – значения в i -й точке; $F(x, y)$ – некоторая аппроксимирующая функция; x, y – координаты в любой принятой системе; ε – остаток, не поддающийся аппроксимации.

Потенциальная энергия оползня является движущей силой процесса, она прямо пропорциональна его массе и высоте, а **силы сопротивления** – поверхностные – пропорциональны площади скольжения [65].

Среди существующих аналитических методов вычисления объемов наиболее применимы способы, используемые в качестве исходных данных площади поверхностей горизонтальных или вертикальных сечений и сеток, которые строятся по результатам инструментальных геодезических наблюдений.

Объем смещающихся масс горных пород поверхности склона вычисляется из разности поверхностей изосмещений всего массива между циклами наблюдений по формуле

$$V_{ji} = f_j(x, y, z) - f_i(x, y, z),$$

где $z_i = f_i(x, y)$ и $z_j = f_j(x, y)$ – поверхности изосмещений предыдущего i и текущего j циклов за определенный период времени наблюдений.

Наиболее эффективными и приемлемыми являются те методы, которые позволяют с высокой точностью описать поверхность объекта в начале и в ходе смещений, т. е. при любых пространственных его положениях.

Общий объем объекта V_0 в пределах оползневого процесса состоит из суммы объемов инженерно-геологических слоев, простирающихся до кровли поверхности скольжения: $V_0 = \sum_{i=1}^n V_i$, где n – количество инженерно-геологических слоев. Абсолютное изменение объемов смещающихся масс ΔV_i вычисляют между поверхностью объекта текущего $z_i = f_i(x, y)$ и начального $z_0 = f_0(x, y)$ циклов наблюдений.

Поверхность изменения массива во времени определяется параметрами смещений точек в пространстве $f_i(x, y, z)$ на основе геодезических наблюдений. Диапазон поверхности заключается в границах максимальных и минимальных координат точек (x_{\min} , x_{\max} и y_{\min} , y_{\max}), которые разбиваются на строки и столбцы. Точность определения объема зависит от величины промежутков строк и столбцов [78].

Если принять, что $x_0 = x_{\min}$, $x_n = x_{\max}$ или $y_0 = y_{\min}$, $y_n = y_{\max}$, то основание каждого частичного промежутка равно $(x_1 - x_0)$, $(x_2 - x_1)$, $(x_3 - x_2)$ и т. д., а высоты их обозначим через $f(z_1)$, $f(z_2)$ (рис. 3.27, а). Тогда площадь каждого промежутка определится как $S_1 = f(z_1)(x_1 - x_0)$, $S_2 = f(z_2)(x_2 - x_1)$, $S_3 = f(z_3)(x_3 - x_2)$ и т. д.

Сумма всех промежутков будет соответствовать площади продольного сечения массива по направлению оси X или Y .

$$S_n = f(z_1)(x_1 - x_0) + f(z_2)(x_2 - x_1) + \dots + f(z_{n+1})(x_{n+1} - x_n) = \sum_{i=1}^{i=n+1} f(z_i)(x_i - x_{i-1})$$

Используя определенный интеграл функции $f(x)$, площадь вертикального сечения выразится формулой

$$F(y) = \int_{x_0}^{x_n} z dx = \int_{x_0}^{x_n} f(x, y) dx$$

или

$$F(x) = \int_{y_0}^{y_n} z dy = \int_{y_0}^{y_n} f(x, y) dy,$$

где n – количество строк.

Для вычисления площади с достаточно высокой точностью можно воспользоваться формулами трапеции

$$S(x) = \int_{x_0}^{x_n} f(x) dx = \frac{x_n - x_0}{n} \left[\frac{z_0 + z_n}{2} + z_1 + z_2 + \dots + z_{n-1} \right]$$

или Симпсона (параболических трапеций) [78]

$$S(x) = \int_{x_0}^{x_n} f(x) dx = \frac{x_n - x_0}{3n} \left[\frac{z_0 + z_n}{2} + (z_1 + z_2 + \dots + z_{n-1}) + (2(z_{1/2} + z_{3/2} + \dots + z_{n-1/2})) \right].$$

При использовании вертикальных плоскостей сечения получают площади вертикальных сечений $S(x_j)$ и объем одновременно по отдельным строкам (рис. 3.28, б).

$$\Delta V_j \approx \Delta x \cdot S(x_j), j = 0, 1, 2, \dots, m; \Delta x_j = \Delta x_{j+1} - x_j,$$

$$\Delta x_{0,1} = x_1 - x_0, \Delta x_{1,2} = x_2 - x_1; \Delta x_{2,3} = x_3 - x_2 \text{ и т.д.,}$$

где i, j – ширина и количество строк соответственно.

Объем массива получается из переменной площади F вертикального сечения, которая зависит от ординаты или абсциссы, т. е.

$$V = \int_{x_0}^{x_n} F dx \text{ или } V = \int_{y_0}^{y_n} F dy.$$

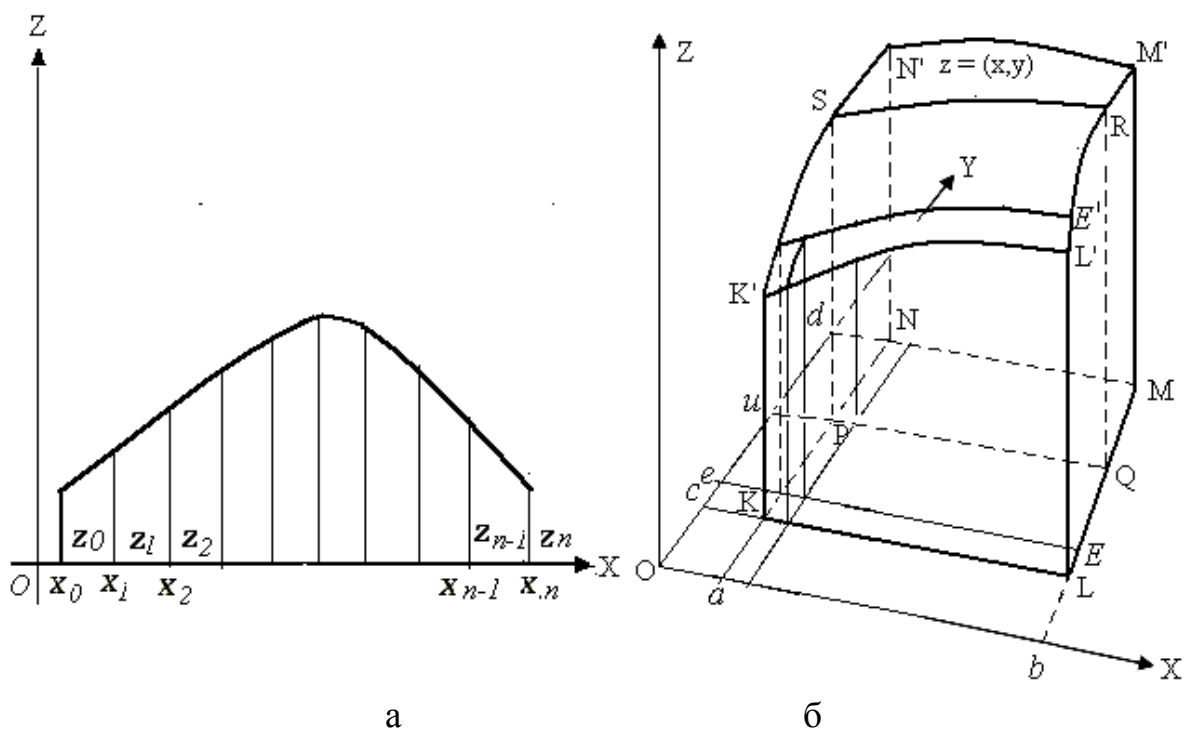


Рис. 3.28. Графическое изображение определения объема по площади трапеций (а) и плоскостям вертикальных сечений (б)

3.2.2. Определение объема смещающихся масс с использованием программы Surfer

Для получения точных значений объема удобно пользоваться программой, позволяющей получать не только числовые результаты, но и строить наглядные графические изображения поверхностей, которые формируются в виде сетки контрольных точек, рассредоточенных по площади в плане и по высоте. Узлы сети используются для построения верхних оснований призматических тел. Нижним основанием каждой призмы является проекция ее на горизонтальную плоскость (см. рис. 3.28, б). Такой программой может быть, например, Surfer.

Перед началом расчетов создается массив исходных данных из плановых координат точек $S(x_i, y_i)$ и значений показателя (z_i) .

Каждая из поверхностей может быть либо горизонтальной плоскостью, либо сеточной функцией, определяемой сеточным файлом. Если же обе поверхности определяются сеточными файлами, то эти файлы должны иметь одинаковые диапазоны изменения координат X, Y и одинаковое количество строк и столбцов. Для горизонтальных плоскостей вычисляются только площади.

Сведения о площадях плоских участков объекта в вычислениях представлены как положительные, отрицательные и горизонтальные. Те участки объекта, где верхняя и нижняя поверхности совпадают, включаются в положительные плоские участки. В программе Surfer реализованы три метода вычисления объемов: трапеций, Симпсона и Симпсона “три восьмых”.

Разность значений, полученных различными методами, может служить качественной оценкой точности вычисления объемов. Если значения объемов, вычисленные всеми тремя методами, разумно близки друг к другу, то они являются хорошим приближением к истинному объему. Если же различные методы дают разные результаты, которые существенно отличаются, то, вероятнее всего, следует увеличить плотность сетки и повторить вычисление объемов. В качестве искомого объема объекта можно принять среднее арифметическое из результатов трех методов.

Относительную погрешность вычисленного объема оценивают путем сравнения результатов трех методов и выражают в процентах от среднего значения

$$\frac{1}{m} = \frac{(V_{\max} - V_{\min})100\%}{V_{\text{сред}}},$$

где $\frac{1}{m}$ – относительная погрешность вычисленного объёма; V_{\max} , V_{\min} – наибольший и наименьший объёмы, полученные тремя методами; $V_{\text{сред}}$ – среднее арифметическое значение объема из трех результатов.

Наиболее общая задача – это вычисление объема смещающихся масс между двумя поверхностями.

Например, по результатам геодезических наблюдений получены данные о поверхности оползневого массива, а по материалам гидрогеологических изысканий – о поверхности кровли водоупорного слоя, которая является поверхностью скольжения. Высоту поверхности склона и поверхности скольжения задают как верхнюю и нижнюю поверхности соответственно. В этом случае во всех точках рассматриваемого участка склона верхняя поверхность будет располагаться выше нижней.

Подсчет объемов снесенных и отложенных земляных масс получают путем вычитания разновременных поверхностей, как показано на рис. 3.29. Здесь A – поверхность начального цикла; B – поверхность смещающихся масс текущего цикла наблюдений; $(B - A)$ – поверхность вычитания.

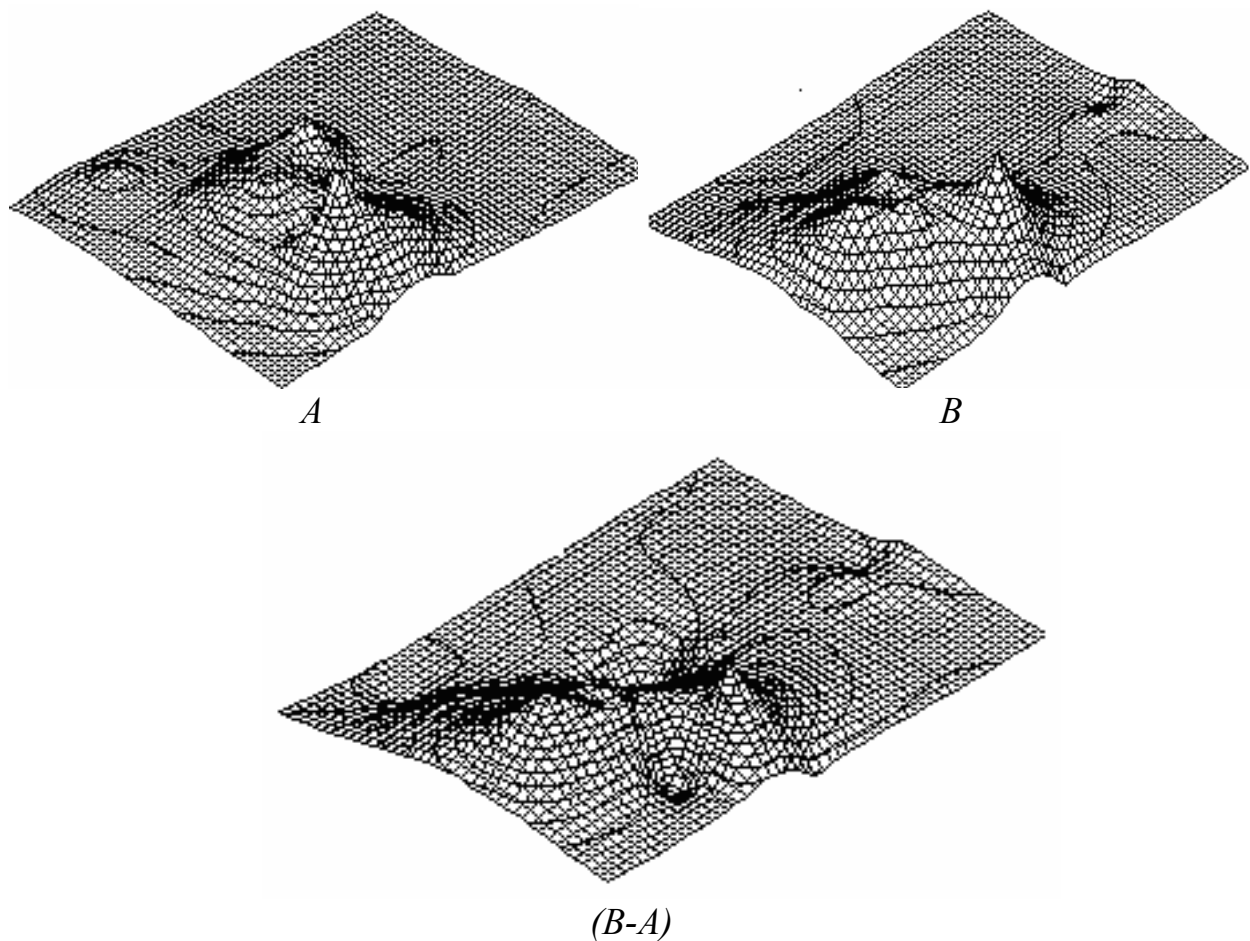


Рис. 3.29. Поверхности изосмещений оползневого склона: верхняя поверхность (A), нижняя (B) и поверхность вычитания (B-A)

Выводы. Таким образом, для выявления активных зон, направления развития оползневого процесса и его движения кинематическую модель оползневого процесса целесообразно представлять в виде графиков, гипсометрических и динамических планов в изолиниях.

С целью установления предполагаемого направления развития оползневого процесса в зависимости от строения склона желательно совмещать гипсометрические планы инженерно-геологических слоев склона и динамические планы оползневых смещений.

4. ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ

4.1. Изучение оползневого процесса с использованием математико-статистических приемов

Математико-статистический прием заключается в изучении по картам или планам пространственных и временных статистических совокупностей и образуемых ими статистических поверхностей. Под статистическими совокупностями понимаем однородные множества величин, которые рассматриваются как случайные, т. е. определяемые комбинацией многих факторов. Их суммарный эффект нельзя предсказать с полной достоверностью, а лишь с некоторой вероятностью. На картах и планах эти совокупности образуют статистические поверхности с максимумами и минимумами параметров модели, которые чаще всего передаются изолиниями или так называемыми псевдоизолиниями [65].

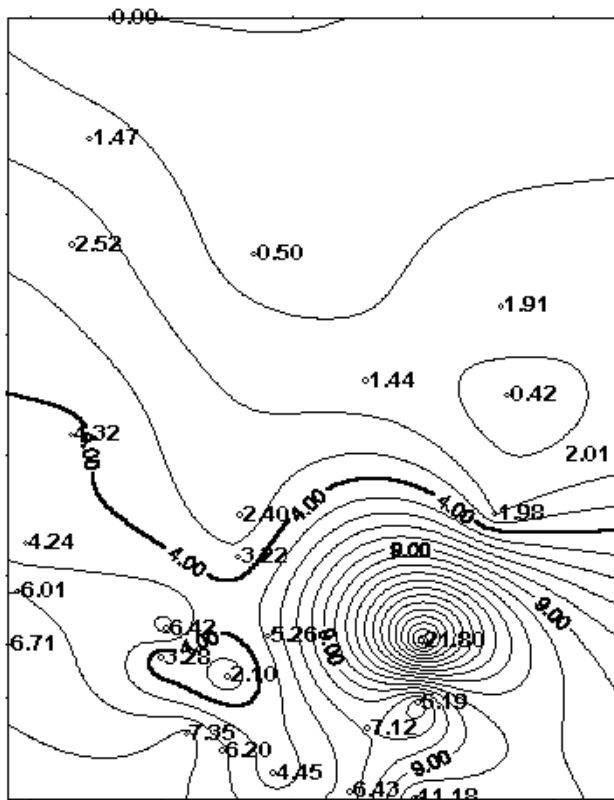
Кинематическая модель оползневого процесса в данном разделе изучается по графическим изображениям пространственных и временных совокупностей, образуемых статистические поверхности с минимальными и максимальными значениями параметров, которые передаются изолиниями.

Приемы математической статистики наилучшим образом приспособлены для изучения распределения, выявления связей основных факторов формирования процессов, изображенных на картах. Применительно к кинематической модели статистическая обработка преследует определённые цели:

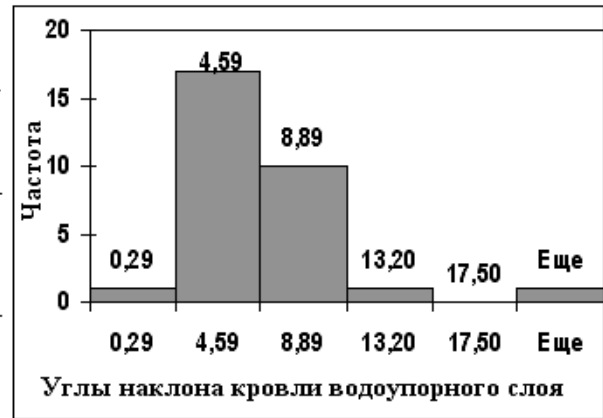
- изучение статистических показателей и законов распределения параметров кинематической модели оползневого процесса;
- анализ формы и тесноты связей между параметрами кинематической модели;
- оценка степени влияния отдельных и определение основных факторов на образование изучаемого оползневого процесса.

За основу всех расчётов и оценок взята выборка, т. е. некоторое подмножество однородных параметров, полученных или по карте, или по результатам инструментальных измерений. Значения величин геометрических параметров строения склона и оползневые смещения сгруппированы по интервалам и представлены в виде отдельных гистограмм, которые показывают, какую долю занимает та или иная величина и каково общее распределение параметров кинематической модели (рис. 4.1, 4.2). Например, для участка “Сокол” наиболее часто встречающаяся (модальная) угловая ступень составляет $4,59 - 8,89^{\circ}$, среднее значение углов – $4,32$, среднее квадратическое отклонение, которое показывает разброс углов наклона относительно среднего – $3,74^{\circ}$.

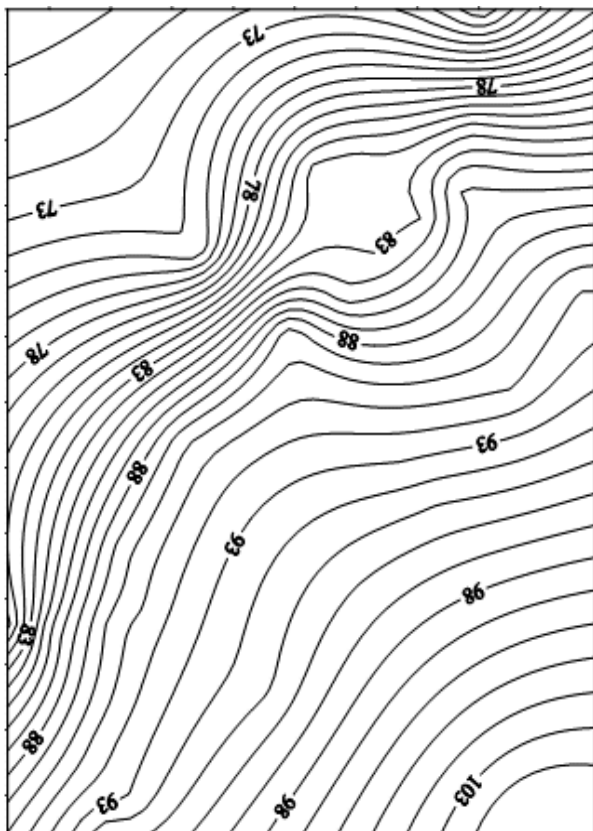
Имея такой набор гистограмм, можно подобрать теоретическую кривую, аппроксимирующую эмпирическое распределение, и описать ее известными уравнениями, выявив тем самым статистический закон распределения любого явления. Кроме нормального распределения, которое описывается Гауссовой кривой, на практике встречаются и другие виды распределений. Наиболее распространёнными являются логарифмическое и экспоненциальное распределения.



а



б

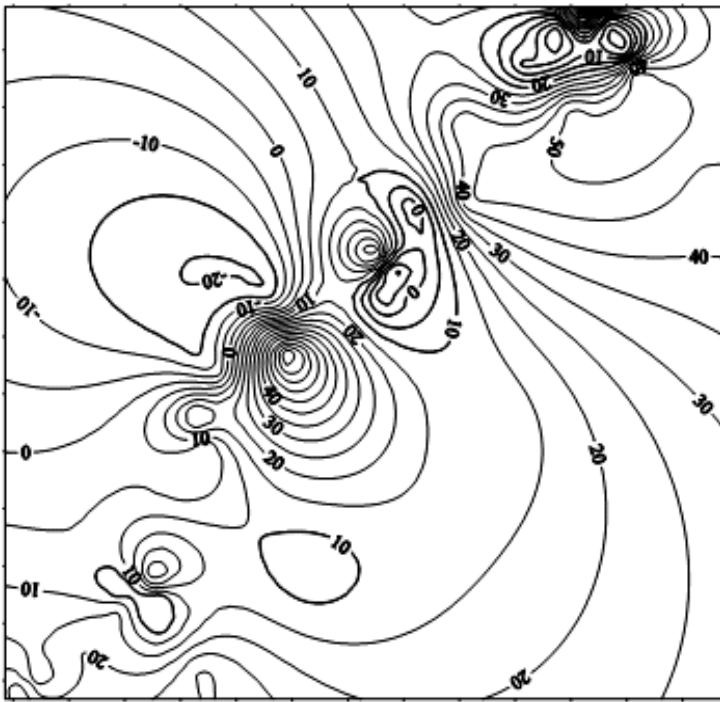


в



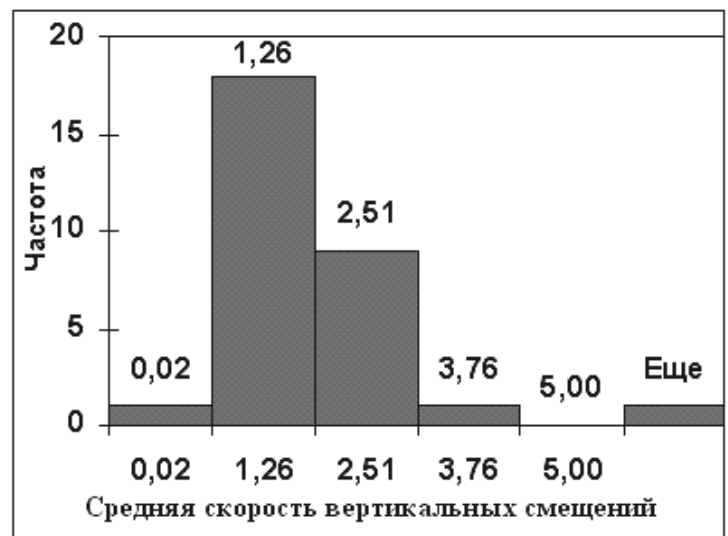
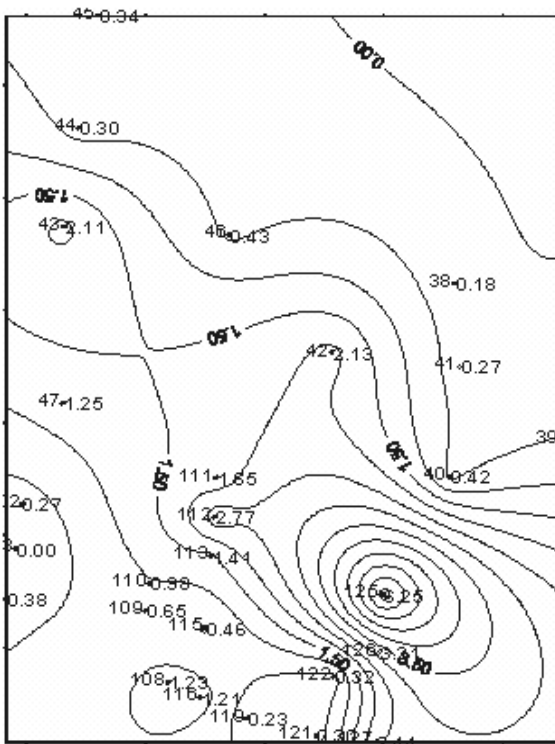
г

Рис. 4.1. Статистические поверхности параметров кинематической модели и гистограммы распределений: асимметричное мономодальное (а, б) – участок "Сокол" и (в, г) – "Сирко"



а

б



в

г

Рис. 4.2. Статистические поверхности параметров кинематической модели и гистограммы распределений: асимметричное мономодальное (а, б) – участок “Сирко”, (в, г) – “Сокол”

Имея такой набор гистограмм, можно подобрать теоретическую кривую, аппроксимирующую эмпирическое распределение, и описать ее известными

уравнениями, выявив тем самым статистический закон распределения любого явления. Кроме нормального распределения, которое описывается Гауссовой кривой, на практике встречаются и другие виды распределений. Наиболее распространенными являются логарифмическое и экспоненциальное распределения. Гистограммы логарифмически нормальных распределений резко ассиметричны, максимальные значения сдвинуты влево, а правая их часть сильно растянута (см. рис. 4.1, 4.2).

По форме гистограмм и виду функций можно выделять типы кровли водоупорного слоя, водоносного горизонта, рельефа, скорости смещений и т.д. и на их основе – участки оползневых процессов в пределах какой-либо территории. Особая роль принадлежит статистическим приемам для выявления связей между развитием оползневых процессов и факторами, формирующими эти процессы. Для этой цели используется корреляционный анализ, который разделяется на более подробные виды: дисперсионный, факторный, регрессионный.

Существует несколько видов дисперсионного анализа. Требуемый вариант выбирается с учетом числа факторов и имеющихся выборок из генеральной совокупности. Однофакторный дисперсионный анализ осуществляется по данным двух или нескольких выборок. При этом сравнивается гипотеза о том, что каждый пример извлечен из одного и того же базового распределения вероятности с альтернативной гипотезой, предполагающей, что базовые распределения вероятности во всех выборках разные. Оценка выполняется с помощью F -критерия Фишера: $F_{крит} = s_{факт}^2 / s_{ост}^2$. Если $F_{крит} \geq F_{факт}$, то гипотеза принимается, а при $F_{факт} \geq F_{крит}$ гипотеза не принимается (табл. 4.1) [68].

Таблица 4.1

Однофакторный дисперсионный анализ

Источник вариации	SS	df	MS	$F_{факт}$	P-значение	$F_{крит}$
Средняя скорость оседаний и углы наклона поверхности водоносного горизонта						
Между группами	365.714	1	365.714	25.5613	0.00002	4.14
Внутри групп	472.142	33	14.3073			
Итого	837.856	34				
Средняя скорость оседаний и мощность пород до поверхности водоносного горизонта						
Между группами	1018.50	1	1018.50	364.354	0,0000	4.35
Внутри групп	55.9073	20	2.7953			
Итого	1074.41	21				
Средняя скорость горизонтальных смещений и мощность пород до водоупорного слоя						
Между группами	1692.96	1	1692.96	461.68	2.74E-1	4.35
Внутри групп	73.3397	20	3.6670			
Итого	1766.30	21				

Из приведенного дисперсионного анализа следует, что средняя скорость оседаний значительно зависит от наклона поверхности водоносного горизонта и

мощности пород до водоносного горизонта, а скорость горизонтальных смещений – от мощности пород до кровли водоупорного слоя. Аналогичный однофакторный дисперсионный анализ выполнен по данным на участке “Сирко”.

4.2. Влияние атмосферных осадков на развитие оползневой процесса

Исследования влияния атмосферных осадков на развитие оползневых процессов естественных склонов балок и оврагов основывались на результатах инструментальных геодезических наблюдений и метеорологических данных с использованием корреляционной связи. На рис. 4.3 представлены графики распределения количества среднемесячных осадков за 1982 – 2003 годы. Наибольшее их количество на территории города за десятилетний период с 1982 по 1992 год зафиксировано в июле, августе 1984 г., в феврале, июне и июле 1985 г., в июле, сентябре и декабре 1989 г. (рис. 4.3).

За второе десятилетие наибольшее количество осадков выпало в апреле и августе 1995 г., в июне-августе 1997 г., в июне 2001 г. и в сентябре 2002 г. При этом даже небольшое повышение осадков разделяют относительно сухие периоды спада интенсивности атмосферных осадков (рис. 4.4).

Зависимость между оползневыми смещениями и атмосферными осадками определялась на основании коэффициента корреляции ($r_{x,y}$). Для установления связи между смещениями и количеством атмосферных осадков вторые были разбиты на четыре варианта весна – осень со смещением на один месяц вперед: 04 – 09 и 10 – 03; 05 – 10 и 11 – 04; 06 – 11 и 12 – 05; 07 – 12 и 01 – 06. Значения коэффициентов корреляции, определенные по четырем вариантам показали их незначительное различие, поэтому для дальнейших расчетов были взяты наблюдения за весенний (декабрь – май) и осенний (июнь – ноябрь) циклы и названы “весна – осень”.

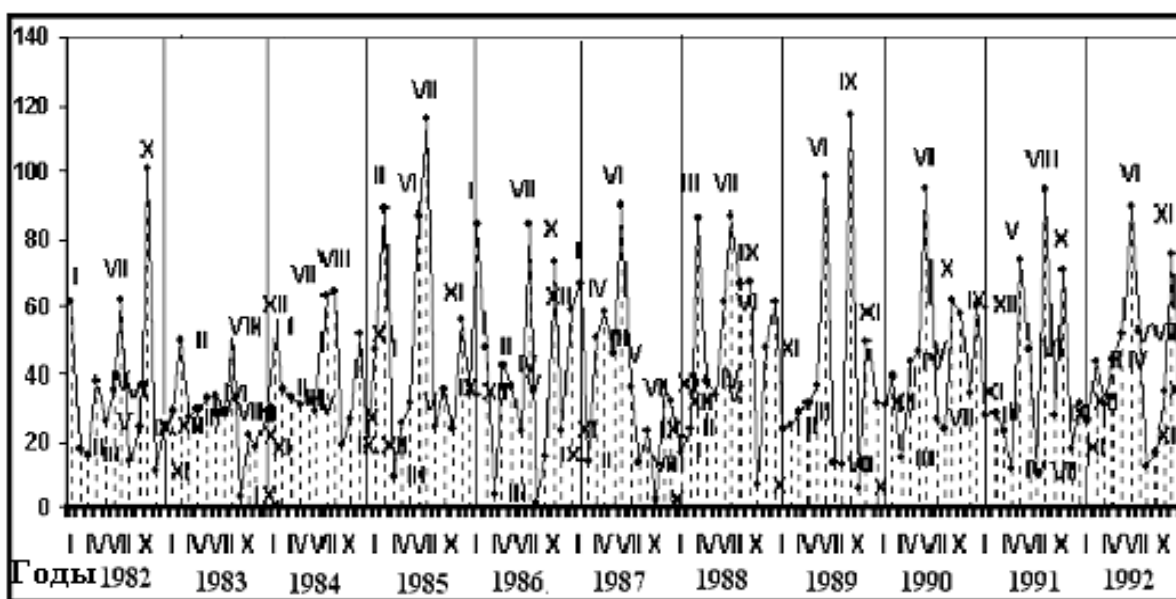


Рис. 4.3. График распределения среднемесячных атмосферных осадков на территории Днепропетровска в 1982 – 1992 гг.

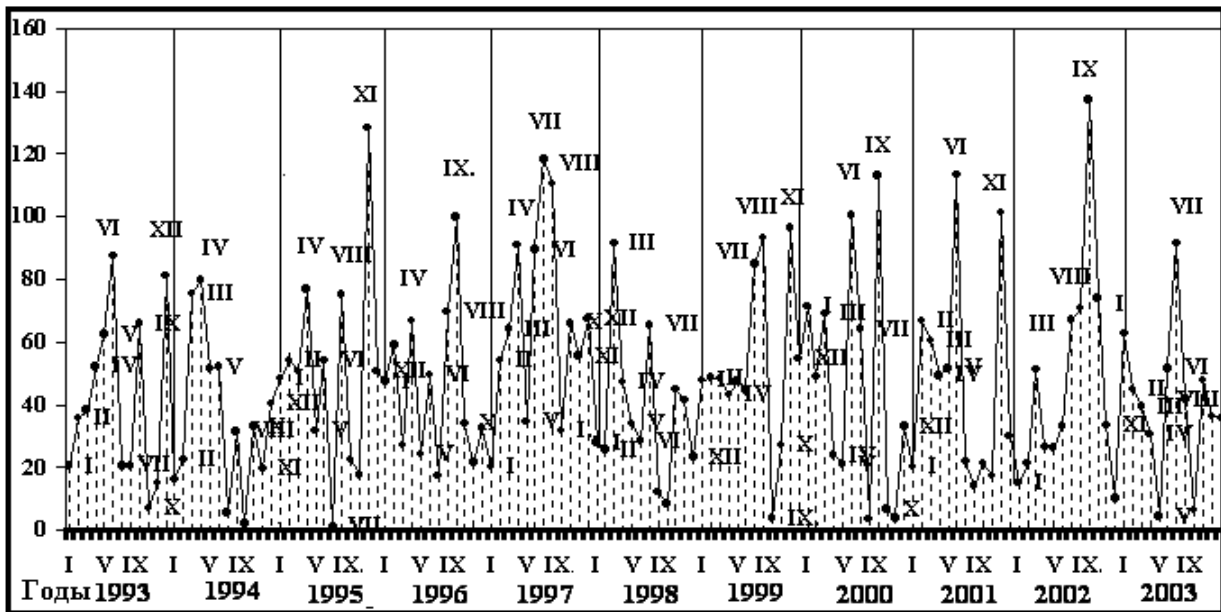


Рис. 4.4. Графики распределения среднемесячных атмосферных осадков на территории Днепропетровска в 1993 – 2003 гг.

Для установления взаимосвязи смещений массива и количества атмосферных осадков на участке “Сокол” построены совмещенные графики (рис. 4.5).

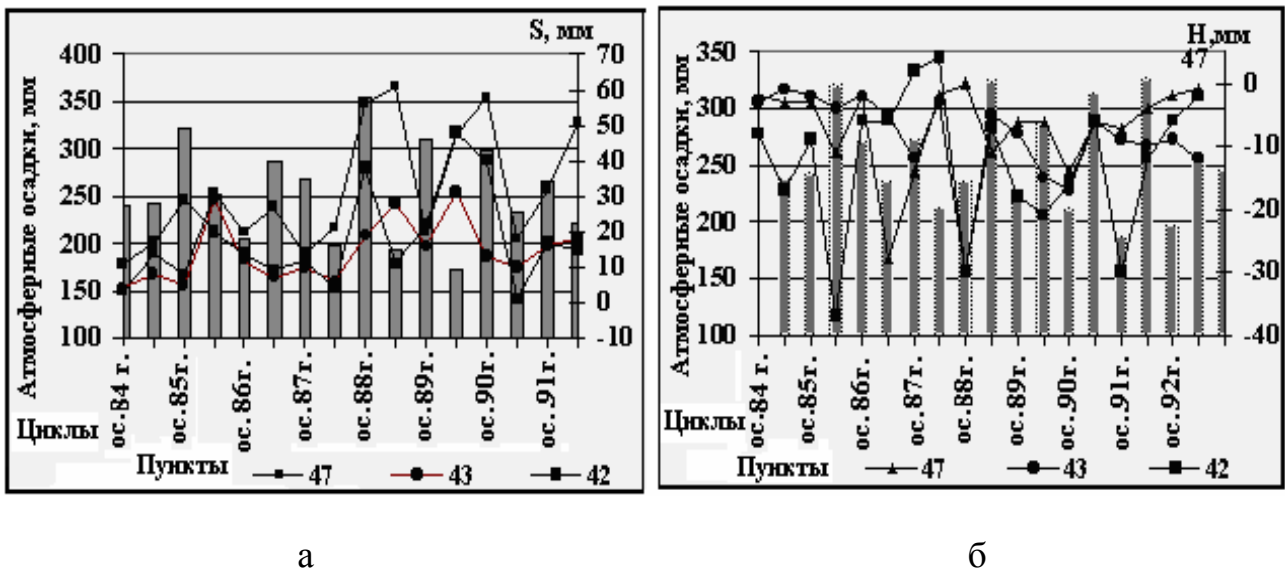


Рис. 4.5. Графики смещений пунктов первой группы и количества атмосферных осадков: горизонтальные (а), вертикальные (б)

Полученные значения коэффициентов корреляции показали зависимость распределения смещений и количества атмосферных осадков от расположения наблюдаемых пунктов. Так, коэффициент парной корреляции пунктов, расположенных на водораздельном плато, в зоне многоэтажной застройки находится в пределах $(-0,37) \leq r_{x,y} \leq 0,39$, что соответствует неопределенной взаимосвязи между смещениями этих пунктов и атмосферными осадками. Тесная корреля-

ционная связь существует между горизонтальными смещениями пунктов второй группы ($r_{x,y} \geq |0,54|$) и слабо выражена между смещениями третьей ($-0,42 \leq r_{x,y} \leq 0,42$). Между вертикальными смещениями второй и третьей групп существует очень тесная связь: ($r_{x,y} = 0,60 - 0,86$), $r_{x,y} \geq |-0,72|$ соответственно (рис. 4.6).

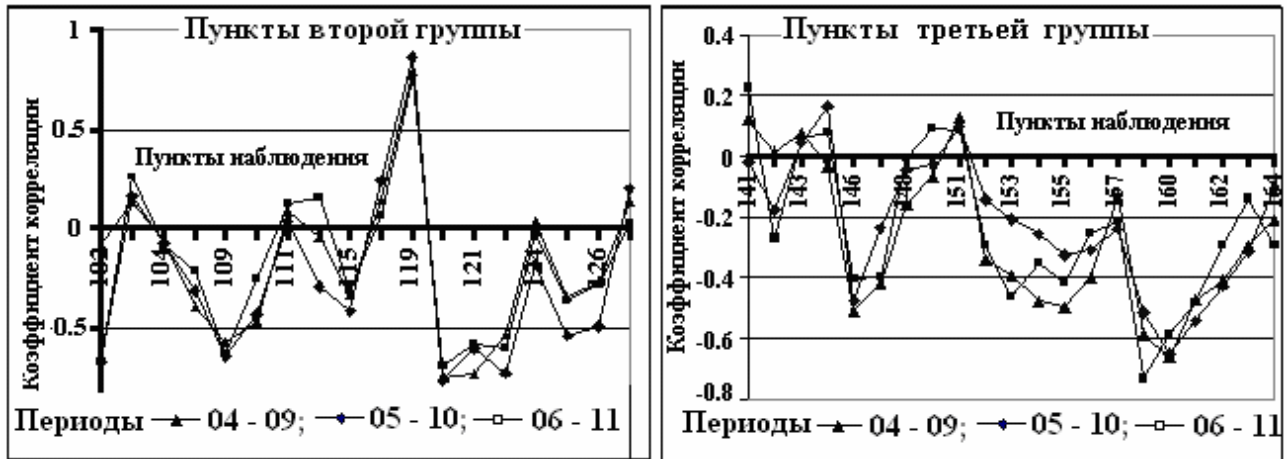


Рис. 4.6. Графики корреляционной зависимости оползневых смещений и атмосферных осадков на склоне участка “Сокол”

На всех остальных пунктах второй и третьей групп теснота корреляционной связи выражает неопределённость.

Аналогичные вычисления выполнялись для пунктов наблюдательной станции участка “Сирко”. Результаты вычислений коэффициентов парной корреляции показали, что смещения пунктов, расположенных на водоразделе застроенной территории и атмосферные осадки находятся в тесной корреляционной связи, $r_{x,y} \geq 0,50$. Наиболее тесная связь существует между вертикальными смещениями пунктов на бровке и профильных линий склона, расположенных на разделанном под огородами склоне (рис. 4.7).

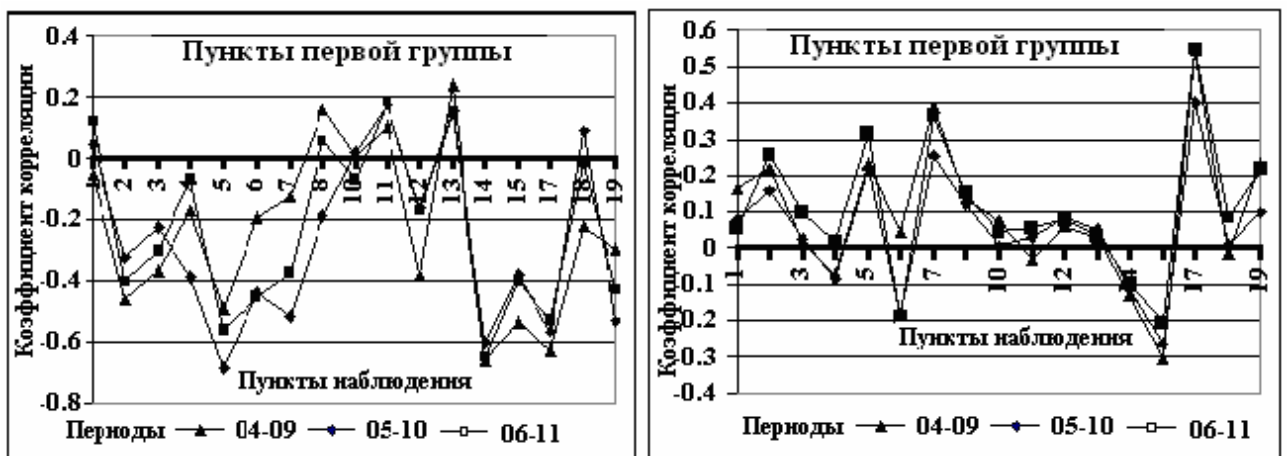
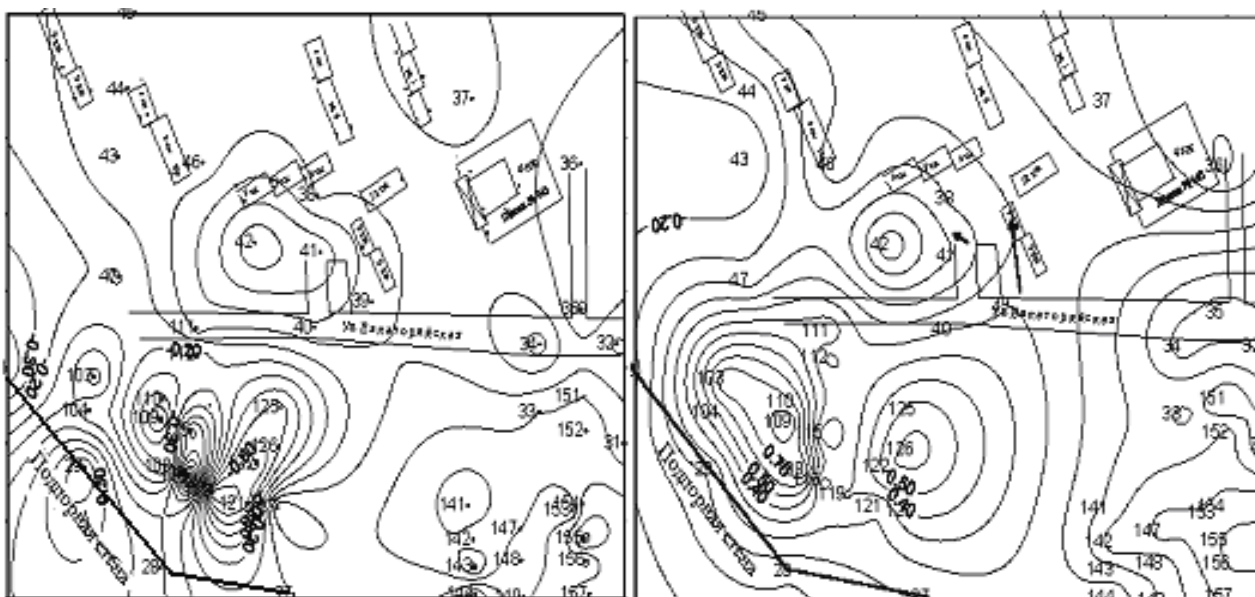


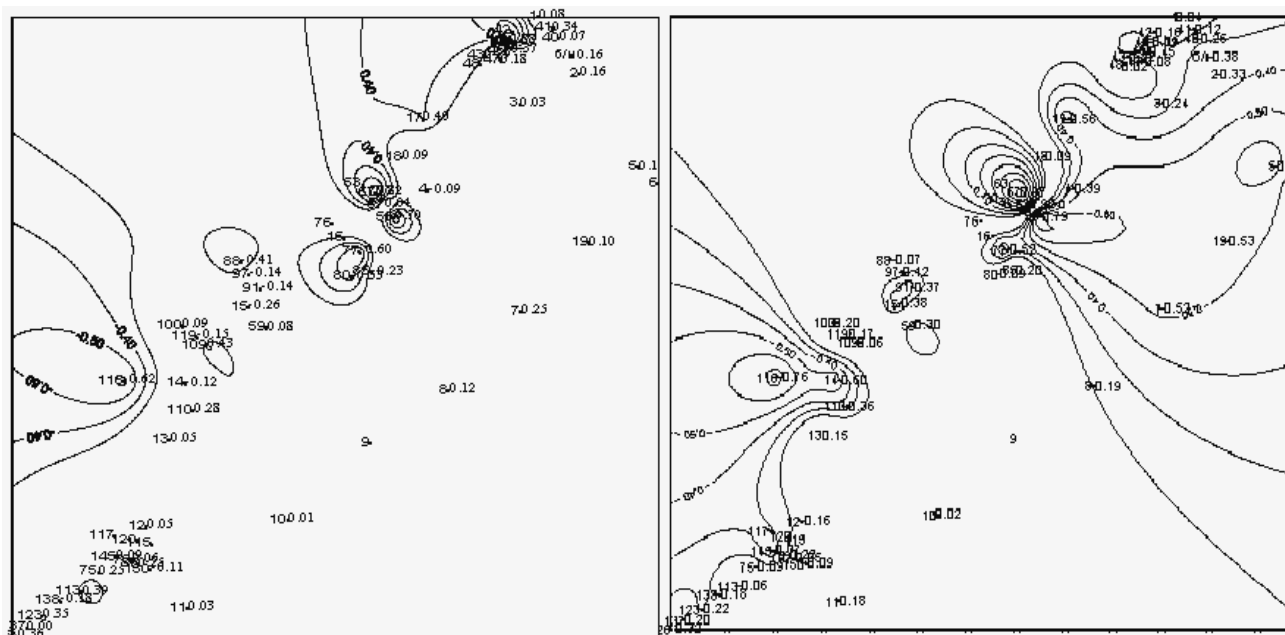
Рис. 4.7. Графики корреляционной зависимости между оползневыми смещениями и атмосферными осадками на склоне участка “Сирко”

Пространственное соотношение пунктов, рассредоточенных по массиву, и атмосферных осадков характеризуют корреляционные планы, на которых равные коэффициенты корреляции изображены изокоррелянтами (рис. 4.8).



а

б



в

г

Рис. 4.8. Планы корреляционной зависимости между смещениями и атмосферными осадками на участках “Сокол” (а, б) и “Сирко” (в, г)

Из приведенных планов корреляций следует, что наибольшее влияние атмосферные осадки оказывают на смещение пунктов, расположенных на территории склонов, верхние слои которых сложены насыпными грунтами или дре-

нажные функции которых значительно снижены в результате хозяйственной деятельности человека.

Таким образом, корреляционные планы можно применять для районирования склонов с выделением участков, устойчивость которых зависит от количества атмосферных осадков. Прежде чем оценить точность взаимосвязи между оползневыми смещениями и атмосферными осадками и составить уравнения регрессии, необходимо составить графическое изображение их (рис. 4.9).

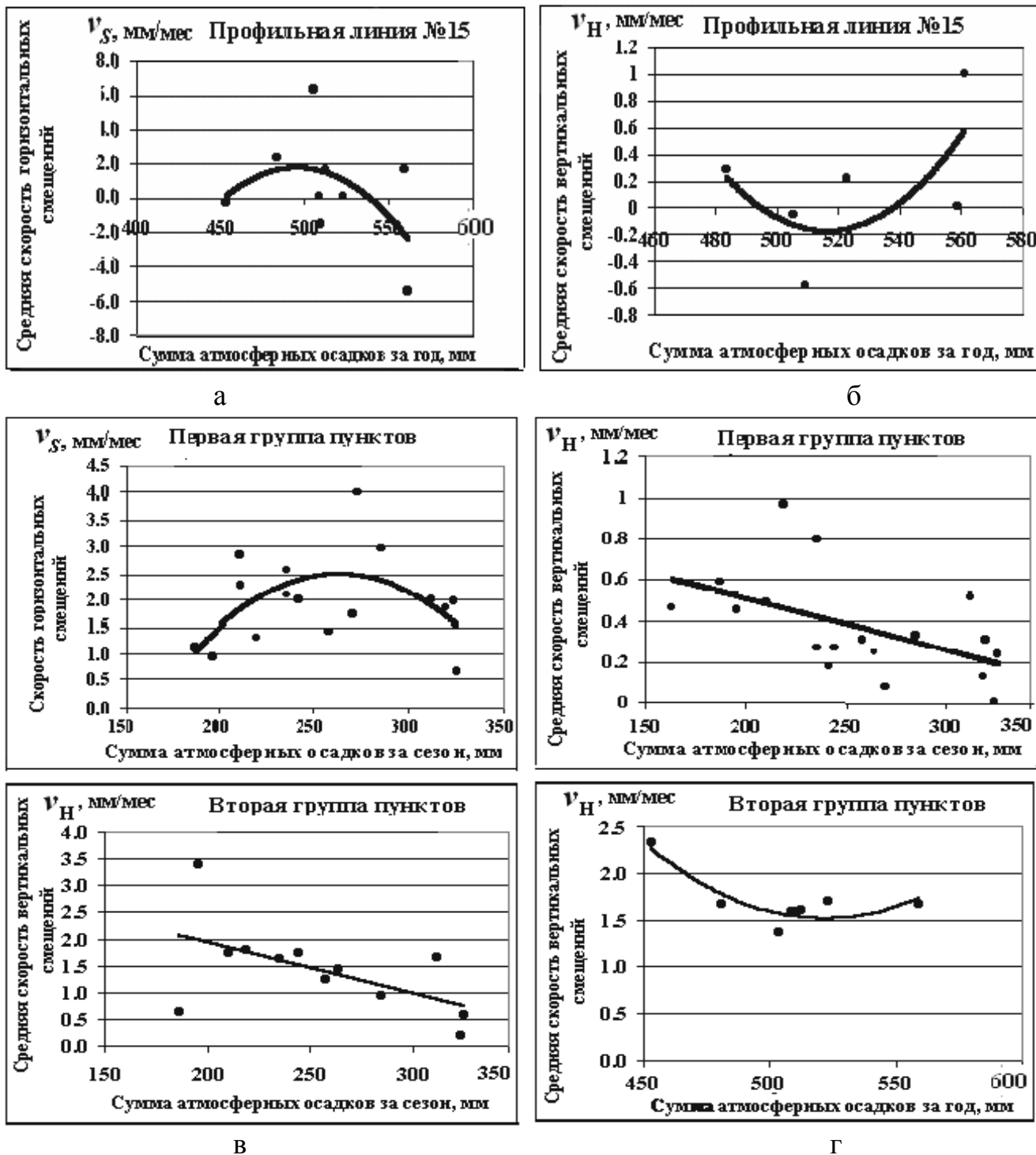


Рис. 4.9. Графики взаимосвязи средней скорости смещений пунктов наблюдательной станции и количества атмосферных осадков на участках "Сирко" (а, б) и "Сокол" (в, г)

Из приведенных графиков на рис. 4.9 видно, что связь между средней скоростью смещений и атмосферными осадками может быть представлена линейной зависимостью, полиномиальным рядом 2-го порядка или параболой.

Таким образом, средняя скорость смещений зависит от количества атмосферных осадков – она изменяется равномерно по параболической зависимости, меняя знак, превращается из прямой в обратную, и наоборот. Из анализа уравнений следует, что с увеличением количества годовых атмосферных осадков скорость горизонтальных смещений и оседаний пунктов увеличивается, достигнув максимума, и начинает уменьшаться, если атмосферные осадки превысят оптимальное значение (табл. 4.2).

Для изучения взаимосвязи между смещениями и количеством атмосферных осадков получены модели и составлены уравнения парной регрессии линейной и параболической форм связи.

Из установленных взаимосвязей оползневых смещений пунктов наблюдательной станции на участке “Сокол” и атмосферных осадков следует, что максимальные или минимальные значения скорости смещений возможны при оптимальном количестве атмосферных осадков. Связь между скоростью горизонтальных смещений пунктов, расположенных за предполагаемой зоной смещений (третья группа), и количеством атмосферных осадков за сезон не установлена.

В отличие от участка “Сокол” на участке “Сирко” горизонтальные смещения пунктов профильной линии № 15 на неукрепленном склоне уменьшались с увеличением количества атмосферных осадков за сезон до минимума. Когда количество атмосферных осадков начинает превышать среднюю норму для региона, смещения увеличиваются, образуя опасность устойчивости склона, верхние слои которого сложены в основном насыпными недоуплотненными грунтами.

В уравнениях (табл. 4.2) приняты обозначения: \mathcal{G}_S , \mathcal{G}_H – средняя скорость горизонтальных и вертикальных смещений; a_t – количество атмосферных осадков.

Таким образом, на оползневые смещения естественных склонов атмосферные осадки оказывают влияние только в том случае, если их количество превышает среднее значение для региона города. Поэтому наиболее тесная взаимосвязь существует между смещениями и количеством атмосферных осадков за год, так как происходит водонасыщение грунтов и изменение глубины грунтовых вод. Вариации скорости горизонтальных смещений пунктов первой, второй и третьей групп на участке “Сокол” зависят от количества атмосферных осадков за год на 52,3, 44,1 и 74,9 % соответственно. Скорость вертикальных смещений – на 46,3, 81 и 82, 1%. Скорость горизонтальных смещений пунктов профильной линии № 15 на склоне участка “Сирко” зависит на 48 – 51 % от количества атмосферных осадков за год.

Таблица 4.2

Корреляционная связь скорости смещений и количества атмосферных осадков на оползневых участках

Группа пунктов	Тип связи	Уравнения связи	$R_{x,y}$	$x_{мин}$
Участок “Сокол”. Средняя скорость смещений и сумма атмосферных осадков за сезон				
2-я	Линейная	$\vartheta_S = 20,588 - 0,0503 a_t$	0,711	409,3
1-я		$\vartheta_H = 1,0266 - 0,0026 a_t$	0,528	394,8
2-я		$\vartheta_H = 3,8228 - 0,0094 a_t$	0,557	406,7
Средняя скорость смещений и сумма атмосферных осадков за год				
1-я	Параболическая	$\vartheta_S = -125,5 + 0,5066 a_t - 0,0005 a_t^2$	0,723	506,6
2-я		$\vartheta_S = -137,16 + 0,5876 a_t - 0,0006 a_t^2$	0,664	489,7
3-я		$\vartheta_S = -43,173 + 0,1739 a_t + 0,0002 a_t^2$	0,865	434,8
1-я		$\vartheta_H = -38,418 + 0,1289 a_t - 0,0001 a_t^2$	0,680	508,2
2-я		$\vartheta_H = 44,397 - 0,1643 a_t + 0,0002 a_t^2$	0,900	410,8
3-я		Линейная	$\vartheta_H = 2,7773 - 0,0049 a_t$	0,907
Участок “Сирко”. Средняя скорость смещений и атмосферные осадки за сезон				
1-я	Параболическая	$\vartheta_S = -14,976 + 0,133 a_t - 0,0003 a_t^2$	0,541	221,7
Линия №15		$\vartheta_S = 81,409 - 0,682 a_t + 0,0017 a_t^2$	0,634	200,6
Средняя скорость смещений и сумма атмосферных осадков за год				
Линия №15	Параболическая	$\vartheta_S = 98,863 - 0,384 a_t + 0,0004 a_t^2$	0,657	480,0
		$\vartheta_H = -51,257 + 0,205 a_t - 0,0002 a_t^2$	0,550	513

4.3. Исследование взаимосвязи между изменением скорости смещений, объемом смещающихся масс и атмосферными осадками

Рассмотрим взаимосвязь между изменением объемов смещающихся масс, скоростью смещений и количеством атмосферных осадков во времени для определения эффективности противооползневых мероприятий.

Объем смещающихся масс определялся по всей площади участка, подверженного смещениям, а глубина смещения есть пространственное положение точек оползня во времени, относительно исходной поверхности оползневого тела. Установление и оценка взаимосвязи между указанными параметрами выполнялась на основании коэффициента корреляции. Коэффициент корреляции между указанными параметрами вычислялся по данным между циклами “весна – осень” и за один год. Изучаемый участок рассматривался не только как

один оползневой массив, а был разбит на два блока в зависимости от скорости горизонтальных смещений и угла наклона кровли водоупорного слоя. Первый блок – верхняя часть склона (угол наклона поверхности скольжения $0 - 5^{\circ}$) и пункты первой группы, второй – средняя и нижняя часть склона (угол наклона поверхности скольжения $5 - 11^{\circ}$) и пункты второй группы.

Для нахождения взаимосвязи объема сдвигающихся масс и скорости смещений, объема сдвигающихся масс и количества атмосферных осадков между циклами “весна – осень” и за год необходимо определить, не обусловлена ли связь между двумя какими-либо параметрами влиянием третьего. Используем коэффициент корреляции. Значения коэффициента парной корреляции между скоростью смещений и объемом смещающихся масс $r = 0,72 \dots 0,83$ и $r = 0,97$ указывает на тесную линейную связь между циклами “весна – осень” и за год. По изображениям конфигурации полей корреляции определяется форма и теснота связи между скоростью смещений и объемами смещающихся масс.

Из рис. 4.10 следует, что между объемом смещающихся масс и количеством атмосферных осадков существует параболическая связь. С увеличением количества атмосферных осадков объем смещающихся масс всего массива и обоих блоков увеличивается.

При достижении оптимального количества атмосферных осадков объем уменьшается из-за увеличения фильтрации поверхностного стока вод и уноса грунтовых масс по склону к его основанию и в тальвег балки. По форме полей корреляции составлены уравнения линейной регрессии в форме параболы 2-го порядка зависимости.

Скорость смещений точек, распределенных по площади общего массива при угле наклона поверхности скольжения $0,5 - 4,5^{\circ}$ между циклами “весна – осень” и за год, находится в параболической зависимости от объема смещающихся масс и в линейной зависимости при угле скольжения $5 - 18^{\circ}$ (рис. 4.11).

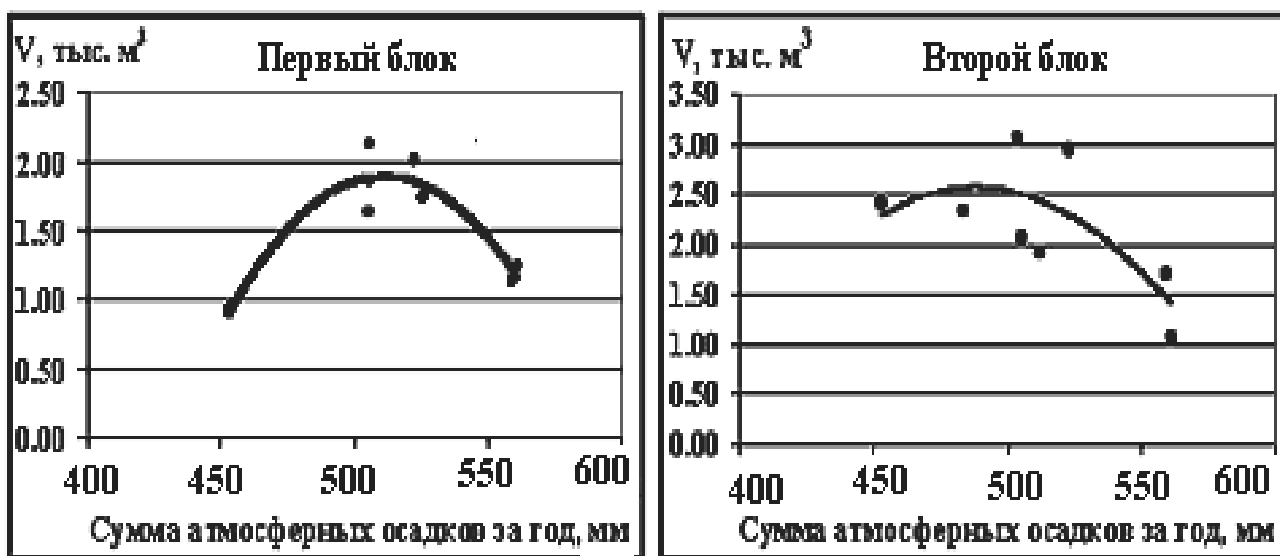


Рис. 4.10. Графики корреляционной зависимости объема смещающихся масс и атмосферных осадков

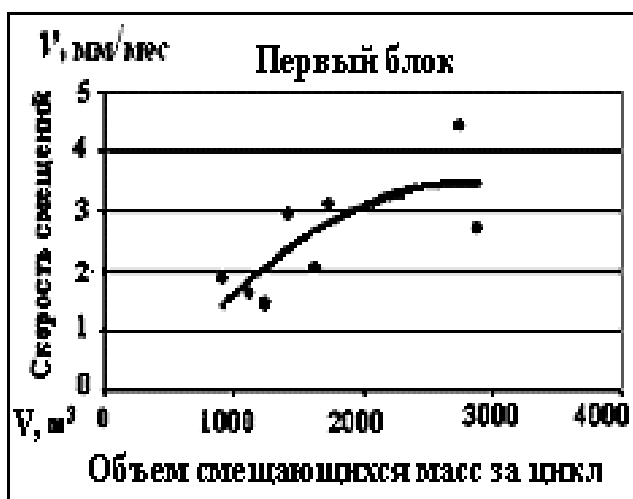
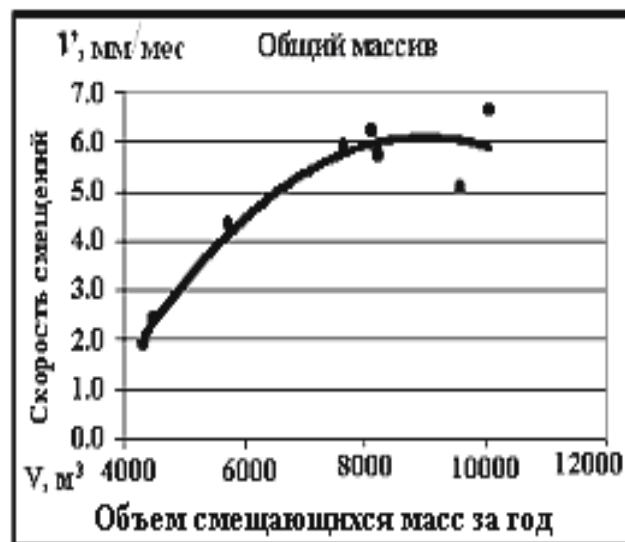
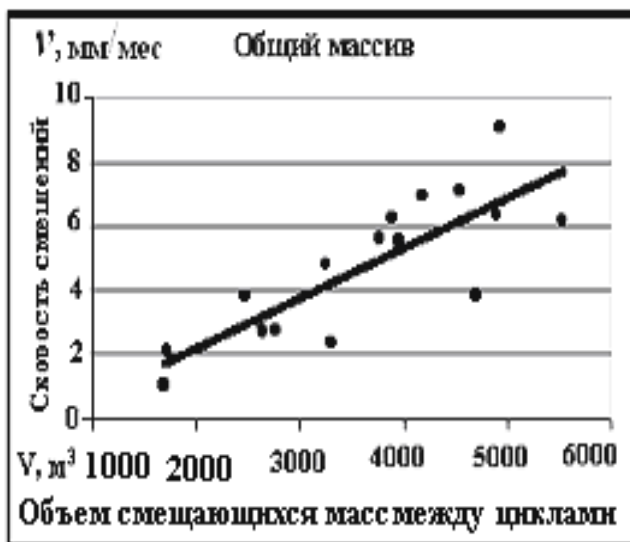


Рис. 4.11. Графики корреляционной зависимости скорости смещений и объёма смещающихся масс на склоне участка “Сокол”

В табл. 4.3 приведены оптимальные значения объемов смещающихся масс и количество атмосферных осадков, когда прямая зависимость переходит в обратную и наоборот. При линейной зависимости показано наименьшее значение объемов смещающихся масс, которые могут влиять на скорость смещений. Так, при изменении объема смещающихся масс относительно начального цикла на 539 за цикл и на 8250 м³ за год скорость смещений уменьшается.

Таблица 4.3

Взаимосвязь параметров оползневых процессов и количества атмосферных осадков на оползневом участке “Сокол”

Период наблюдений	Тип связи	Уравнения связи	$R_{x,y}$	$\Delta V_{\min}, \text{м}^3$
Уравнения зависимости объема смещающихся масс и количества атмосферных осадков				
Год	Параболическая	Общий массив ($\beta = 0,5 - 18^0$) $\Delta V = -175072 + 759,53a_t - 0,7845a_t^2$	0,856	484,1
		Первый блок ($\beta = 0,5 - 5^0$) $\Delta V = -748,3 + 300,34a_t - 0,284a_t^2$	0,936	511
		Второй блок ($\beta = 5 - 18^0$) $\Delta V = -47382 + 206,15a_t - 0,212a_t^2$	0,676	483,2
Уравнения зависимости скорости смещений и объема смещающихся масс				
Цикл	Линейная	Общий массив ($\beta = 0,5 - 18^0$) $\vartheta_{\Delta V} = -0,863 + 0,0016\Delta V$	0,873	539,4
	Параболическая	Первый блок ($\beta = 0,5 - 5^0$) $\vartheta_{\Delta V} = -0,445 + 0,0051\Delta V - 2 \cdot 10^{-6}\Delta V^2$	0,731	12750
	Линейная	Второй блок ($\beta = 5 - 18^0$) $\vartheta_{\Delta V} = -1,696 + 0,0077\Delta V$	0,832	220,3
Год	Параболическая	Общий массив ($\beta = 0,5 - 5^0$) $\vartheta_{\Delta V} = -8,803 + 0,003\Delta V - 2 \cdot 10^{-7}\Delta V^2$	0,960	8250
		Первый блок ($\beta = 0,5 - 5^0$) $\vartheta_{\Delta V} = -0,945 + 0,003\Delta V - 5 \cdot 10^{-6}\Delta V^2$	0,754	3100
	Линейная	Второй блок ($\beta = 5 - 18^0$) $\vartheta_{\Delta V} = -3,257 + 0,0047\Delta V$	0,976	693

Принятые обозначения в уравнениях табл. 4.3: $\vartheta_{\Delta V}$ – скорость смещений оползневых смещающихся масс; ΔV – изменение объема, смещающихся масс между циклами и относительно начального цикла; a_t – количество атмосферных осадков.

Выводы. Приемы математической статистики были использованы для изучения законов распределений параметров кинематической модели, оценки сте-

пени влияния отдельных факторов на формирования оползневых процессов, а также для установления взаимосвязи между параметрами кинематической модели.

Установлено, что построение статистических поверхностей в изолиниях позволяет исследовать поверхность рельефа оползня и геометрические параметры строения склона по всей площади участка и устанавливать с использованием коэффициента корреляции возможные места образования оползня.

На основании однофакторного дисперсионного анализа сделано следующее заключение: наиболее влияющими на скорость горизонтальных и вертикальных смещений пунктов являются угловые и линейные параметры строения склона – угол наклона кровли водоупорного слоя, глубина водоносного горизонта, уровень подземных вод и индекс обводнения.

Корреляционно-регрессионным анализом установлены ожидаемые значения средней скорости горизонтальных и вертикальных смещений для склонов аналогичного строения. За счет вариации глубины водоносного горизонта и мощности водоносного горизонта объясняется 93,4% и 96,4% вариации скорости горизонтальных смещений и за счет вариации мощности пород до водоупорного слоя лишь 3,81%.

Вариации скорости горизонтальных смещений пунктов первой, второй и третьей групп на участке “Сокол“ зависят от количества атмосферных осадков за год на 52,3, 44,1 и 74,9 % соответственно. Скорость вертикальных смещений – на 46,3, 81 и 82, 1%. Скорость горизонтальных смещений пунктов профильной линии № 15 на склоне участка “Сирко“ зависит на 48 – 51 % от количества атмосферных осадков за год.

С превышением количества атмосферных осадков до оптимального значения объем смещающихся грунтовых масс и скорость смещений склонов, сложенных лессовидными грунтами, уменьшается. При увеличении объема смещающихся масс, скорость смещения увеличивается, причем имеет корреляционную линейную и параболическую зависимости.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ОПОЛЗНЕВОГО ПРОЦЕССА НА ОСНОВЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВО ВРЕМЕНИ

5.1. Динамические ряды кинематических характеристик смещений

Изучение развития оползневых процессов во времени удобно выполнять с использованием статистической динамики. Кинематические характеристики смещений представляют статистические динамические ряды оползневых процессов, которые показывают их активизацию или затухание. Из анализа динамических рядов оползневых смещений разных циклов следует, что на участке “Сирко” оползневой процесс приостановился, а на участке “Сокол” – находится в стадии развития.

Так, в 1990 г. горизонтальные смещения пунктов, расположенных на застроенной территории водораздельного плато (первая группа), между циклами достигли максимального значения – 48 мм. Однако нередко смещение следующего цикла меньше смещения предыдущего. Например, смещения в 1988 г. меньше, чем в 1987, к тому же с 1990 г. заметно уменьшение их (табл. 5.1, рис. 5.1). Таким образом, наблюдается тенденция уменьшения смещений. В отдельные годы смещения испытывают колебания, отклоняясь от основной тенденции увеличения.

Таблица 5.1

Динамика смещений оползневых пунктов первой группы
на участке “Сокол

Год, период цикла		Горизонтальные смещения, мм		Вертикальные смещения, мм	
		между циклами “осень – весна”	за год	между циклами “осень – весна”	за год
1985	весна	-	19	-1	-3
	осень	12		-2	
1986	весна	10	22	-1	-4
	осень	12		-3	
1987	весна	15	31	-1	-4
	осень	16		-3	
1988	весна	14	20	-2	-3
	осень	6		-1	
1989	весна	14	30	-1	-3
	осень	16		-2	
1990	весна	15	48	-3	-6
	осень	33		-3	
1991	весна	21	38	-4	-6
	осень	16		-2	
1992	весна	14	26	-3	-5
	осень	12		-2	
1993	весна	-	-	-2	-2
	осень	-			

Колебания оползневых смещений связаны в основном с изменением некоторых показателей инженерно-геологических элементов строения склона (подъем уровня грунтовых вод, обводнение массива, проседание лессовых пород и т.п.) и различием метеорологических условий в разные периоды лет.

Вертикальные смещения пунктов первой группы незначительны, их оседание не превышает 6 мм в год, в смещениях пунктов второй группы наблюдается тенденция к уменьшению (рис. 5.1).

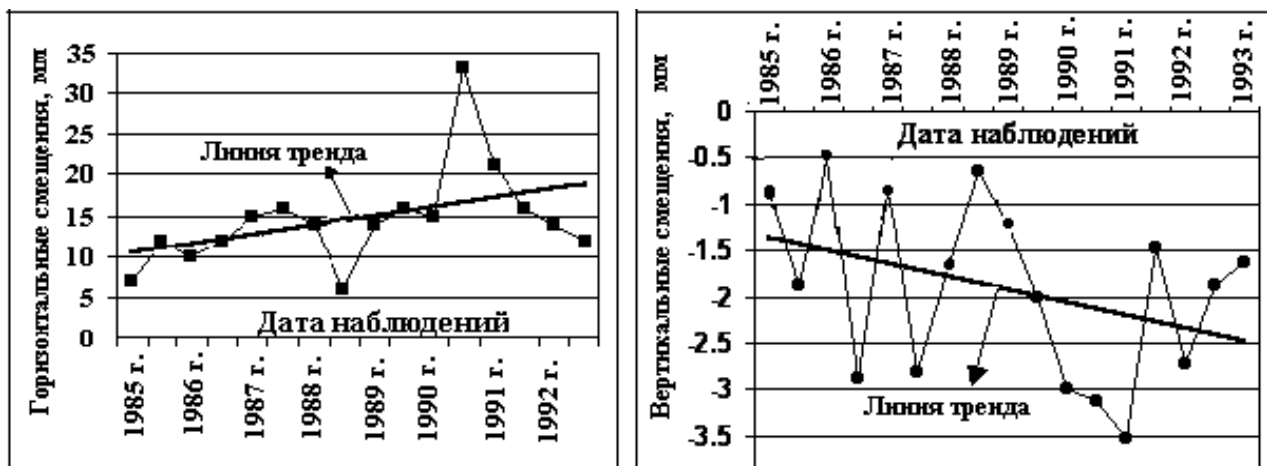


Рис. 5.1. Динамика смещений пунктов первой группы во времени участок “Сокол”

Таблица 5.2

Динамика смещений оползневых пунктов второй группы

Год, период цикла		Горизонтальные смещения, мм		Вертикальные смещения, мм	
		между циклами “осень – весна”	за год	между циклами “осень – весна”	за год
1985	весна	12	24	-	-
	осень	12		-	
1986	весна	32	73	-10	-20
	осень	41		-10	
1987	весна	78	119	-11	-21
	осень	41		-10	
1988	весна	20	44	-7	-10
	осень	24		-4	
1989	весна	75	127	-11	-17
	осень	52		-6	
1990	весна	65	112	-10	-14
	осень	55		-4	
1991	весна	59	119	-9	-17
	осень	60		-8	
1992	весна	67	148	-8	-15
	осень	81		-7	
1993	весна	-	-	-10	-21
	осень	-		-11	

Динамика горизонтальных смещений пунктов, расположенных на самом склоне (вторая группа), показывает линейную тенденцию увеличения, хотя их величины иногда значительно колеблются относительно линии тренда. Динамический ряд вертикальных смещений представляет полиномиальную тенденцию увеличения (см. табл. 5.2, рис. 5.2).

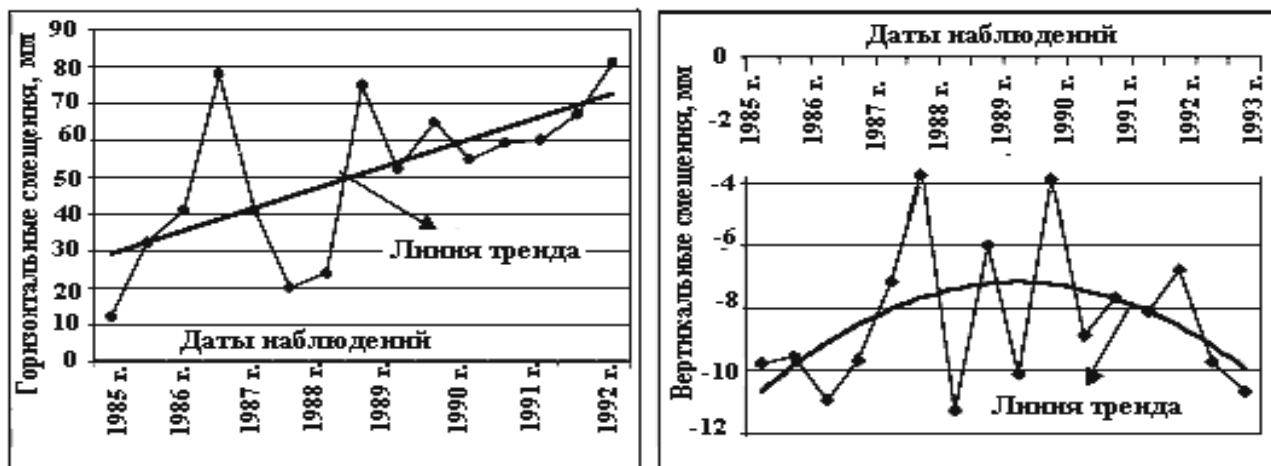


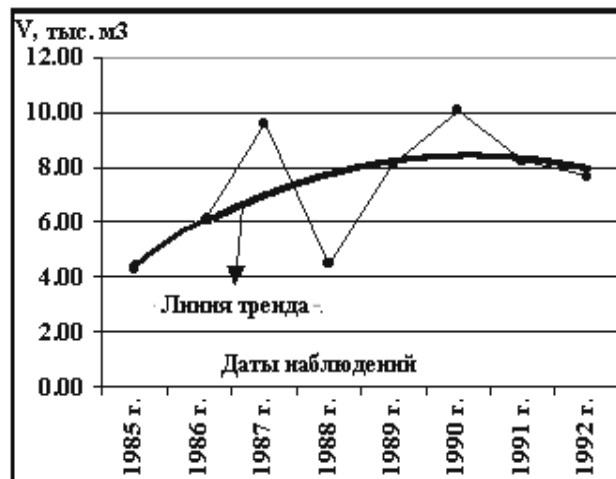
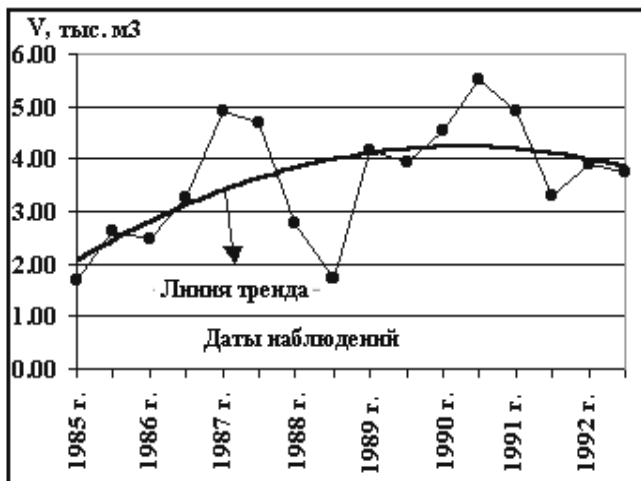
Рис. 5.2. Динамика оползневых смещений пунктов второй группы во времени, участок “Сокол”

Если сравнивать кинематику объема смещающихся масс в разные периоды, то можно сделать вывод, что изменение объема ΔV сползающих масс возрастает, хотя между циклами не наблюдается последовательность увеличения, а наоборот, встречается резкое уменьшение или увеличение. Например, весной и осенью 1988 г. объем смещающихся масс уменьшился по сравнению с тем, какой был отмечен осенью 1987 и весной 1989 гг. Поэтому увеличение объема смещающихся масс оползневого массива на участке “Сокол” лишь в общем можно считать как тенденцию (табл. 5.3, рис. 5.3).

Таблица 5.3

Динамика изменения объема смещающихся масс всего массива на участке “Сокол”

Год, период цикла		Изменение объема смещающихся грунтовых масс ΔV , тыс. м ³		Год, период цикла		Изменение объема смещающихся грунтовых масс ΔV , тыс. м ³	
		между циклами “осень – весна”	за год			между циклами “осень – весна”	за год
1985	весна	1,689	4,077	1989	весна	7,193	8,488
	осень	2,635			осень	3,946	
1986	весна	2,494	5,740	1990	весна	4,542	10,453
	осень	3,245			осень	5,529	
1987	весна	4,896	9,564	1991	весна	4,924	7,809
	осень	4,697			осень	2,886	
1988	весна	2,756	5,917	1992	весна	3,869	7,609
	осень	1,723			осень	3,740	



а

б

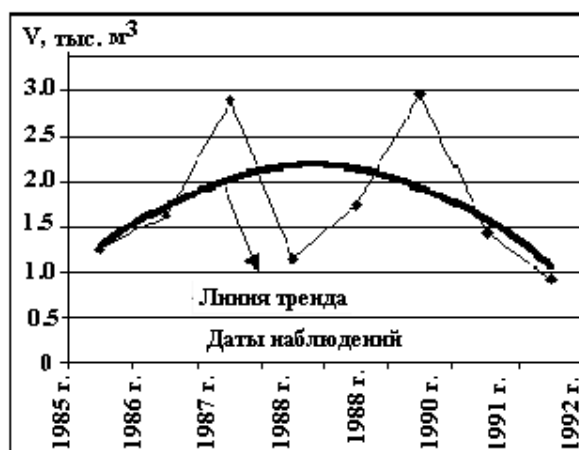
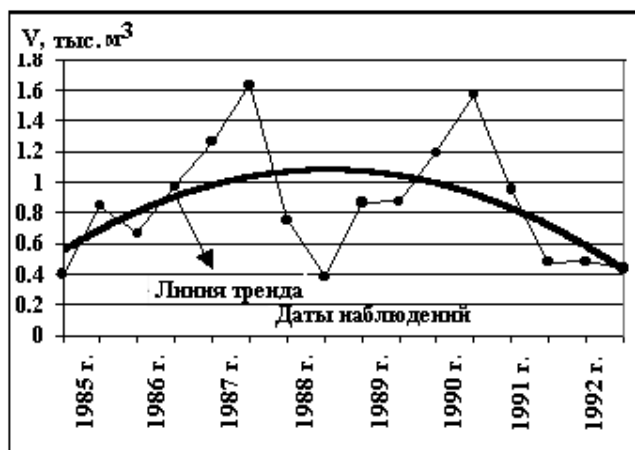
Рис. 5.3. Динамика объема смещающихся масс всего массива между циклами “весна – осень” (а) и за год (б)

Изменение объема смещающихся грунтовых масс первого блока при углах наклона поверхности скольжения от 0 до 5 и второго блока от 5 до 18° характеризуются параболической тенденцией (табл. 5.4 и рис. 5.4, табл. 5.5 и рис. 5.5).

Таблица 5.4

Динамика изменения объема смещающихся масс первого блока на участке “Сокол”

Год, период цикла		Изменение объема сместившихся грунтовых масс ΔV , тыс. м ³		Год, период цикла		Изменение объема сместившихся грунтовых масс ΔV , тыс. м ³	
		между циклами “осень – весна”	за год			между циклами “осень – весна”	за год
1985	весна	0,398	1,243	1989	весна	0,866	1,742
	осень	0,844			осень	0,875	
1986	весна	0,665	1,638	1990	весна	1,190	2,757
	осень	0,973			осень	1,566	
1987	весна	1,261	2,893	1991	весна	0,948	1,425
	осень	1,631			осень	0,477	
1988	весна	0,748	1,133	1992	весна	0,479	0,915
	осень	0,384			осень	0,436	



а

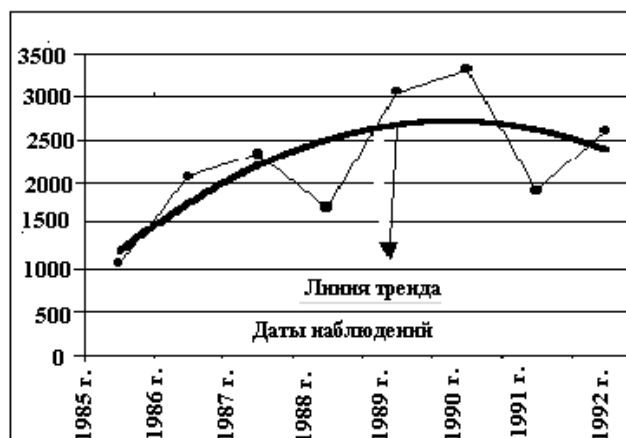
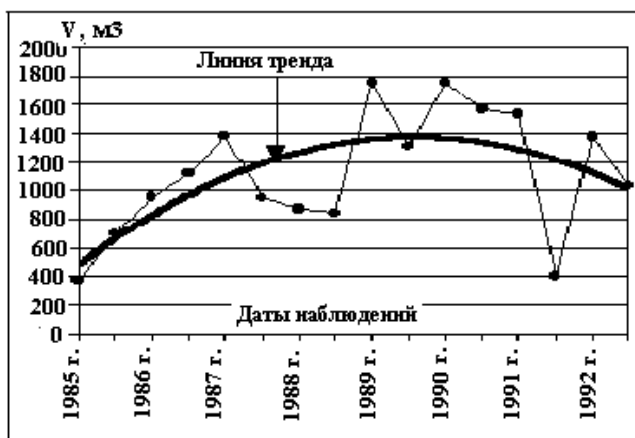
б

Рис. 5.4. Динамика изменения объема сместившихся масс первого блока между циклами “весна – осень” (а) и за год (б)

Таблица 5.5

Динамика изменения объема смещающихся масс второго блока на участке “Сокол”

Год, период цикла		Изменение объёма сместившихся грунтовых масс ΔV , тыс. м ³		Год, период цикла		Изменение объёма сместившихся грунтовых масс ΔV , тыс. м ³	
		между циклами “осень – весна”	за год			между циклами “осень – весна”	за год
1985	весна	0,373	1,067	1989	весна	1,750	3,060
	осень	0,694			осень	1,310	
1986	весна	0,953	2,086	1990	весна	1,754	3,321
	осень	1,114			осень	1,566	
1987	весна	1,380	2,329	1991	весна	1,530	1,933
	осень	0,950			осень	1,200	
1988	весна	0,873	1,715	1992	весна	1,376	2,410
	осень	0,842			осень	1,033	



а

б

Рис. 5.5. Динамика изменений объема сместившихся масс второго блока: между циклами “весна – осень” (а) и за год (б) на участке “Сокол”

Расчет характеристик изменений объема смещающихся масс во времени всего оползневого массива, а также первого и второго блоков определялись с применением статистических средств Excel (табл. 5.6 – 5.8). Для этого использовались следующие расчеты:

– изменение объема смещающихся масс за цикл

$$\Delta V_i = V_{i+1} - V_i,$$

где V_i, V_{i+1}, V_1 – объемы за текущий, предыдущий и начальный циклы.

– абсолютное (цепное) и базисное изменение объема между циклами

$$\Delta V_{i(abc)} = V_{i+1} - \Delta V_i;$$

$$\Delta V_{j(баз)} = \Delta V_{i+1} - \Delta V_1,$$

– ускорение абсолютного изменения объема рассчитывается по формуле:

$$\omega_{\Delta V_{i(abc)}} = \Delta V_{i+1} - \Delta V_i;$$

– темп роста изменения объема смещающихся масс цепной и базисный

в м^3

$$K_{\Delta V_i} = \Delta V_{i+1} / \Delta V_i \text{ и } K_{\Delta V_j} = \Delta V_{i+1} / \Delta V_1,$$

в процентах

$$K_{\Delta V_i} = \left(K_{\Delta V_i} - 1 \right) 100\% , K_{\Delta V_j} = \left(K_{\Delta V_j} - 1 \right) 100\% .$$

Например, выполненный расчет показал, что осенью 1992 г. базисный абсолютный прирост смещающихся земляных масс всего массива соответствовал 2,072 тыс. м^3 , т.е. объем смещающихся масс изменился – увеличился на 2,072 тыс. м^3 по сравнению с весной 1985 г.

Весной 1985 г. цепной темп роста объема между циклами в форме коэффициента равен 1,56, т. е. осенью этого же года объем смещающихся масс увеличился в 1,56 раза по сравнению с весной 1985 г., или на 56 % (табл. 5.6).

Объем смещающихся масс осенью 1992 г. увеличился относительно начального цикла в 2,23 раза. Ускорение характеризуется изменением объема смещающихся масс во времени. В результате исследований установлено, что абсолютное ускорение на протяжении всего периода наблюдений изменяло свой знак и поэтому судить об ускорении или замедлении развития оползневого процесса невозможно. Однако изменение объема смещающихся грунтовых масс равномерно увеличивается и существует средний абсолютный прирост.

Изменение объемов смещающихся масс обоих блоков показало, что осенью 1985 г. коэффициенты цепного темпа роста составили 1,86 и 2,12, т.е. объем возрос по сравнению с весной 1985 г. в 1,86 и 2,12 раза или на 86 и 112 % (табл. 5.7 и 5.8).

Таблица 5.6

Характеристика динамики объема смещающихся масс общего массива на участке “Сокол”

Период наблюдений	Номер цикла	Объем смещающихся масс за цикл, м ³	Абсолютное изменение объема между циклами, м ³		Ускорение абсолютного изменения объема, м ³ /цикл	Коэффициент темпа роста объема между циклами, м ³		Темп роста объема смещающихся масс, %	
			цепное	базисное		цепной	базисный	цепной	базисный
1984 г., осень	0								
1985 г., весна	1	1689,1							
1985 г., осень	2	2635,27	946,17	946,17		1,560	1,560	56,02	56
1986 г., весна	3	2494,36	-158,57	787,6	-1104,74	0,940	1,47	-6,02	47
1986 г., осень	4	3245,78	769,08	1556,68	927,65	1,311	1,922	31,05	92
1987 г., весна	5	4896,05	1650,27	3206,95	881,19	1,508	2,90	50,84	190
1987 г., осень	6	4697,6	-198,45	3008,5	-1848,72	0,959	2,78	-4,05	178
1988 г., весна	7	2756,2	-1937,71	1070,79	-1739,26	0,588	1,63	-41,25	63
1988 г., осень	8	1723,45	-1036,44	34,35	901,27	0,624	1,02	-37,55	2
1989 г., весна	9	4193,28	2454,35	2488,7	3490,79	2,424	2,47	142,41	147
1989 г., осень	10	3946,44	-231,36	2257,34	-2685,71	0,945	2,34	-5,54	134
1990 г., весна	11	4542,06	595,62	2852,96	826,98	1,151	2,69	15,09	169
1990 г., осень	12	552,9	986,84	3839,8	391,22	1,217	3,27	21,73	227
1991 г., весна	13	4923,72	-605,18	3234,62	-1592,02	0,891	2,92	-10,95	192
1991 г., осень	14	2885,62	-1623,04	1611,58	-1017,86	0,670	1,95	-32,96	95
1992 г., весна	15	3868,95	-2228,22	2196,97	-605,18	1,177	2,30	17,74	130
1992 г., осень	16	3739,67	-125,03	2071,94	2103,19	0,968	2,23	-3,22	123
Среднее абсолютное ускорение			129,496						
Средний темп роста			0,139						

Таблица 5.7

Характеристика динамики объема смещающихся масс первого блока
на участке “Сокол

Период наблюдений	Номер цикла	Изменение объема смещающихся масс за цикл, м ³	Абсолютное изменение объема смещающихся масс между циклами, м ³		Ускорение абсолютно-го изменения объема масс, м ³ /цикл	Темп роста объема смещающихся масс между циклами, м ³		Темп роста объема смещающихся масс, %	
			цепное	базисное		цепной	базисный	цепной	базисный
1984 г., осень	0								
1985 г., весна	1	373,18							
1985 г., осень	2	694,12	320,94	320,94		1,86	1,86	86,0	86
1986 г., весна	3	953,40	259,28	580,22	- 61,661	1,37	2,55	37,35	155
1986 г., осень	4	1114,92	161,52	741,74	- 97,76	1,17	2,99	16,94	199
1987 г., весна	5	1379,88	264,96	1006,70	103,44	1,24	3,70	23,76	270
1987 г., осень	6	949,88	- 430,00	576,71	- 694,96	0,69	2,54	- 31,16	154
1988 г., весна	7	873,94	- 75,94	500,76	354,05	0,92	2,34	- 8,00	134
1988 г., осень	8	842,02	- 31,92	468,84	44,02	0,96	2,26	- 3,65	126
1989 г., весна	9	1750,39	908,37	1377,21	940,30	2,08	4,69	107,88	369
1989 г., осень	10	1310,13	- 440,26	936,95	- 1348,63	0,75	3,51	- 25,15	251
1990 г., весна	11	1754,71	444,58	1381,532	884,84	1,339	4,702	33,93	370
1990 г., осень	12	1566,39	- 188,32	1193,212	- 632,9	0,893	4,197	- 10,73	320
1991 г., весна	13	1530,30	- 36,09	1157,122	152,23	0,977	4,101	- 2,30	310
1991 г., осень	14	1200,00	- 330,3	826,822	- 294,21	0,784	3,216	- 21,58	222
1992 г., весна	15	1376,42	176,42	1003,242	506,72	1,147	3,688	14,70	236
1992 г., осень	16	1033,6	- 342,82	660,422	- 519,24	0,751	2,770	- 24,91	177
Среднее абсолютное ускорение			41,276						
Средний темп роста			0,185						

Таблица 5.8

Характеристика динамики объема смещающихся масс второго блока
на участке "Сокол"

Период наблюдений	Номер цикла	Изменение объема смещающихся масс за цикл, м ³	Абсолютное изменение объема смещающихся масс за цикл м ³		Ускорение изменения объема масс, м ³ /цикл	Темп роста объема смещающихся масс за цикл, м ³		Темп роста объема смещающихся масс, %	
			цепное	базисное		цепной	базисный	цепной	базисный
1984 г., осень	0								
1985 г., весна	1	398,289							
1985 г., осень	2	844,906	446,617	446,617		2,121	2,121	112,13	112
1986 г., весна	3	664,833	- 180,07	266,540	- 180,07	0,787	1,669	-21,31	67
1986 г., осень	4	973,372	308,539	575,083	308,54	1,464	2,444	46,41	144
1987 г., весна	5	1261,58	288,208	863,291	288,21	1,296	3,167	29,61	217
1987 г., осень	6	1631,66	370,08	1233,37	370,08	1,293	4,097	29,33	310
1988 г., весна	7	748,407	- 883,25	350,12	- 883,25	0,459	1,879	- 54,13	88
1988 г., осень	8	384,366	- 364,04	- 13,923	- 364,04	0,514	0,965	- 48,64	- 4
1989 г., весна	9	866,951	482,585	468.662	482,58	2,256	2,177	125,55	118
1989 г., осень	10	875,098	8,147	476.809	8,15	1,009	2,197	0,94	120
1990 г., весна	11	1190,72	315,622	792.431	315,622	1,361	2,990	48,41	199
1990 г., сень	12	1767,2	576,48	1368.91	576,48	1,484	4,437	6,07	344
1991 г., весна	13	948,078	- 819,12	549.789	- 819,12	0,536	2,380	- 46,35	138
1991 г., сень	14	476.600	- 471,48	78.311	- 471,48	0,503	1,197	- 49,73	20
1992 г., весна	15	479,762	3,162	81.473	3,162	1,007	1,205	0,66	20
1992 г., сень	16	435,978	- 43,784	37.689	- 43,784	0,909	1,095	- 9,13	9
Среднее абсолютное ускорение					2,356				
Средний темп роста					0,068				

Объем смещающихся оползневых масс между циклами “весна – осень” первого и второго блоков увеличился по сравнению с начальным циклом соответственно на 0,038 и 0,660 тыс. м³.

Таким образом, объем смещающихся масс всего оползневого массива осенью 1992 г. увеличился относительно начального цикла (осень 1985 г.) в 2,2 раза, первого и второго блоков в 1,1 и 12,5 раза соответственно, т. е. существует средний абсолютный темп роста 0,139 для общего массива, 0,068 и 0,185 для первого и второго блоков.

Среднее абсолютное ускорение смещающихся масс всего оползневого тела составило 129,496, первого блока – 2,356 и второго – 41,276 м³/мес. Аналогично можно сделать выводы по полученным значениям цепных и базисных темпов роста объемов в виде коэффициентов для любого цикла наблюдений.

Исследования динамики оползневого процесса показали, что тенденцию смещений и изменений объема смещающихся масс горных пород склона с их минимумами и максимумами, при действии угловых и линейных показателей геометрического строения склона, наиболее точно отражает параболическая форма трендов, выраженная формулой

$$y = a + bt + ct^2,$$

где a – начальный уровень тренда в период, принятый за начальный цикл времени t ; b – средний абсолютный прирост смещений или изменений объемов смещающихся масс оползневого процесса за цикл наблюдений, константа тренда; c – квадратичный параметр, равный половине ускорения, константа параболического тренда.

Парабола 2-го порядка имеет либо максимум (если $b > 0$ и $c < 0$), либо минимум ($b < 0$ и $c > 0$). Такой характер развития оползневого процесса возможен при наличии влияющих факторов (выпадение количества атмосферных осадков сверх нормы, принятой для региона, подъем уровня грунтовых вод, неравномерное обводнение лессовых пород и т. п.), которые или ускоряют развитие оползневого процесса или, наоборот, задерживают.

5.2. Взаимосвязь между параметрами оползневого процесса и инженерно-геологическими элементами строения склона

Для определения зависимости параметров оползневых смещений от параметров инженерно-геологического строения склона целесообразно применять корреляционную связь. Это поможет найти уравнения, отражающие зависимость параметров оползневых процессов от значений одного или нескольких факторов, влияющих на этот процесс, а также тесноту связи двух или большего количества показателей факторов между собой.

Установление взаимосвязи между кинематическими характеристиками смещений и геометрическими параметрами строения склонов на участках “Сокол” и “Сирко” выполнялось с использованием методов математической ста-

тики и компьютерного моделирования. Используя метод математической статистики средствами Excel, строятся поля парной корреляции, подбираются и составляются математические зависимости между указанными параметрами. По конфигурации поля корреляции в виде точечных диаграмм можно сразу судить о форме и тесноте связи. Адекватность подобранных моделей оценивалась при помощи коэффициента детерминации R^2 , критерия Фишера – F , критерия Стьюдента – t и доверительных интервалов [61].

Надежность установления корреляционной связи проверяется по средней случайной квадратической ошибке m_r коэффициента корреляции

$$m_r = \frac{1 - r^2}{\sqrt{(n - 2)}},$$

где r – коэффициент корреляции; n – количество выборки.

Зная среднюю квадратическую ошибку коэффициента корреляции m_r и значение самого коэффициента корреляции r , вычисляют их соотношение критерия Стьюдента t , т. е. оценку достоверности корреляционной связи

$$t = \frac{r}{m_r}.$$

Для установления взаимосвязи скорости оползневых смещений и инженерно-геологического строения склона последние были разбиты по измеримости на угловые и линейные геометрические параметры. Надежность установленной связи проверяется сравнением табличного значения t -критерия Стьюдента $t_{кр}$ и вычисленного $t_{факт}$ при уровне значимости $p = 0,05$. Если $t_{факт} \geq t_{кр}$, то между смещениями и параметрами геометрии строения склона существует связь. Если $t_{факт} \leq t_{кр}$ проверяемого фактора, который на самом деле не мог не влиять на результативный признак, то это указывает на то, что связь надежно не установлена.

Из анализа полученных данных следует, что скорость горизонтальных смещений пунктов, расположенных на водораздельном плато застроенной территории, находится в тесной зависимости с угловыми геометрическими параметрами строения склона: углами наклона кровли водоупорного слоя, крутизной рельефа и направлением заложения водоупорного слоя, а также линейными – мощностью пород до водоносного горизонта и индексом обводнения. Скорость вертикальных смещений зависит только от углов наклона и направления заложения водоупорного слоя и уровня грунтовых вод (табл. 5.9).

Скорость горизонтальных смещений пунктов второй группы (при $p = 0,05$, $t_{кр} = 2,11$) зависит от мощности пород до водоносного горизонта ($r = - 0,45$, $t_{факт} = 2,39$), уровня подземных вод ($r = - 0,62$, $t_{факт} = 4,27$), скорость вертикальных смещений пунктов этой группы – от углов наклона кровли водоупор-

ного слоя ($r = 0,62$, $t_{факт} = 2,91$), мощности пород до водоносного горизонта ($r = -0,59$, $t_{факт} = 3,88$) и индекса обводнения ($r = 0,72$, $t_{факт} = 6,23$) (табл. 5.10).

Таблица 5.9

Корреляционная зависимость средней скорости оползневых смещений от угловых параметров строения склона на участке “Сокол

Факторы	Геометрические параметры строения склона				
	Угол наклона кровли водоупорного слоя	Угол склона водоносного горизонта	Крутизна рельефа	Дирекционный угол заложения кровли	
				водоупорного слоя	водоносного горизонта
Средняя скорость горизонтальных смещений. Первая группа пунктов: $n = 10$, $P = 0,05$, $t_{кр} = 2,36$					
r	0,89	0,45	0,81	0,60	-0,14
m_r	0,074	0,273	0,210	0,141	0,347
$t_{факт}$	12,03	1,65	3,86	2,62	0,06
Вторая группа пунктов: $n=19$, $P=0,05$, $t_{кр} = 2,11$					
r	0,26	0,26	-0,14	0,27	-0,15
m_r	0,220	0,220	0,218	0,218	0,231
$t_{факт}$	1,17	1,17	1,25	1,26	0,63
Первая и вторая группа пунктов: $n=29$, $P=0,05$, $t_{кр} = 2,05$					
r	0,58	0,58	0,27	0,49	-0,14
m_r	0,125	0,125	0,175	0,144	0,185
$t_{факт}$	4,64	4,64	1,55	1,67	0,74
Средняя скорость вертикальных смещений. Первая группа: $n=10$, $P=0,05$, $t_{кр} = 2,36$					
r	0,58	0,47	0,15	0,31	0,16
m_r	0,234	0,277	0,346	0,319	0,344
$t_{факт}$	2,47	1,70	0,44	0,98	0,47
Вторая группа пунктов: $n=19$, $P=0,05$, $t_{кр} = 2,11$					
r	0,62	0,48	0,25	0,33	-0,18
m_r	0,213	0,284	0,221	0,210	0,229
$t_{факт}$	2,91	1,69	1,13	1,58	-0,78
Первая и вторая группа пунктов: $n=29$, $P=0,05$, $t_{кр} = 2,05$					
r	0,56	0,11	0,27	0,38	-0,08
m_r	0,129	0,187	0,175	0,161	0,188
$t_{факт}$	2,43	0,60	0,41	0,89	-0,40

Таблица 5.10

Корреляционная зависимость средней скорости оползневых смещений от линейных параметров строения склона на участке “Сокол

Линейные геометрические параметры строения склона					
Факторы	Мощность пород до		Мощность водоносного горизонта	Уровень подземных вод	Индекс обводнения
	водоносного горизонта	водоупорного слоя			
Средняя скорость горизонтальных смещений. Первая группа пунктов: $n=11$, $P=0,05$, $t_{кр}=2,36$					
r	-0,63	-0,41	0,22	-0,28	0,64
m_r	0,212	0,294	0,337	0,325	0,209
$t_{факт}$	2,99	1,39	0,65	0,87	3,07
Вторая группа: $n=18$, $P=0,05$, $t_{кр}=2,11$					
r	-0,45	-0,30	-0,17	-0,62	-0,10
m_r	0,188	0,214	0,229	0,145	0,233
$t_{факт}$	2,39	1,42	0,76	4,27	0,43
Первая и вторая группа: $n=29$, $P=0,05$, $t_{кр}=2,05$					
r	-0,70	0,65	0,04	-0,80	0,38
m_r	0,098	0,112	0,192	0,068	0,165
$t_{факт}$	7,14	5,80	0,22	11,8	2,29
Средняя скорость вертикальных смещений. Первая группа пунктов: $n=11$, $P=0,05$, $t_{кр}=2,26$					
r	0,07	-0,18	-0,37	-0,23	-0,18
m_r	0,053	0,139	0,138	0,052	0,031
$t_{факт}$	1,00	0,86	0,86	0,95	0,97
Вторая группа: $n=18$, $P=0,05$, $t_{кр}=2,11$					
r	0,59	0,196	0,151	0,16	0,72
m_r	0,153	0,227	0,230	0,224	0,115
$t_{факт}$	3,88	0,86	-0,66	1,01	6,23

Исходя из значений коэффициентов корреляции r и критерия Стьюдента t , теснота связи между средней скоростью горизонтальных смещений пунктов второй группы и угловыми геометрическими параметрами строения склона, а также между скоростью вертикальных смещений пунктов первой и совместно первой и второй и линейными геометрическими параметрами не установлена.

Как видно из приведенных ниже графиков, кроме линейной корреляции между оползневыми смещениями и геометрическими параметрами строения склона существует и параболическая связь (рис. 5.6, 5.7).

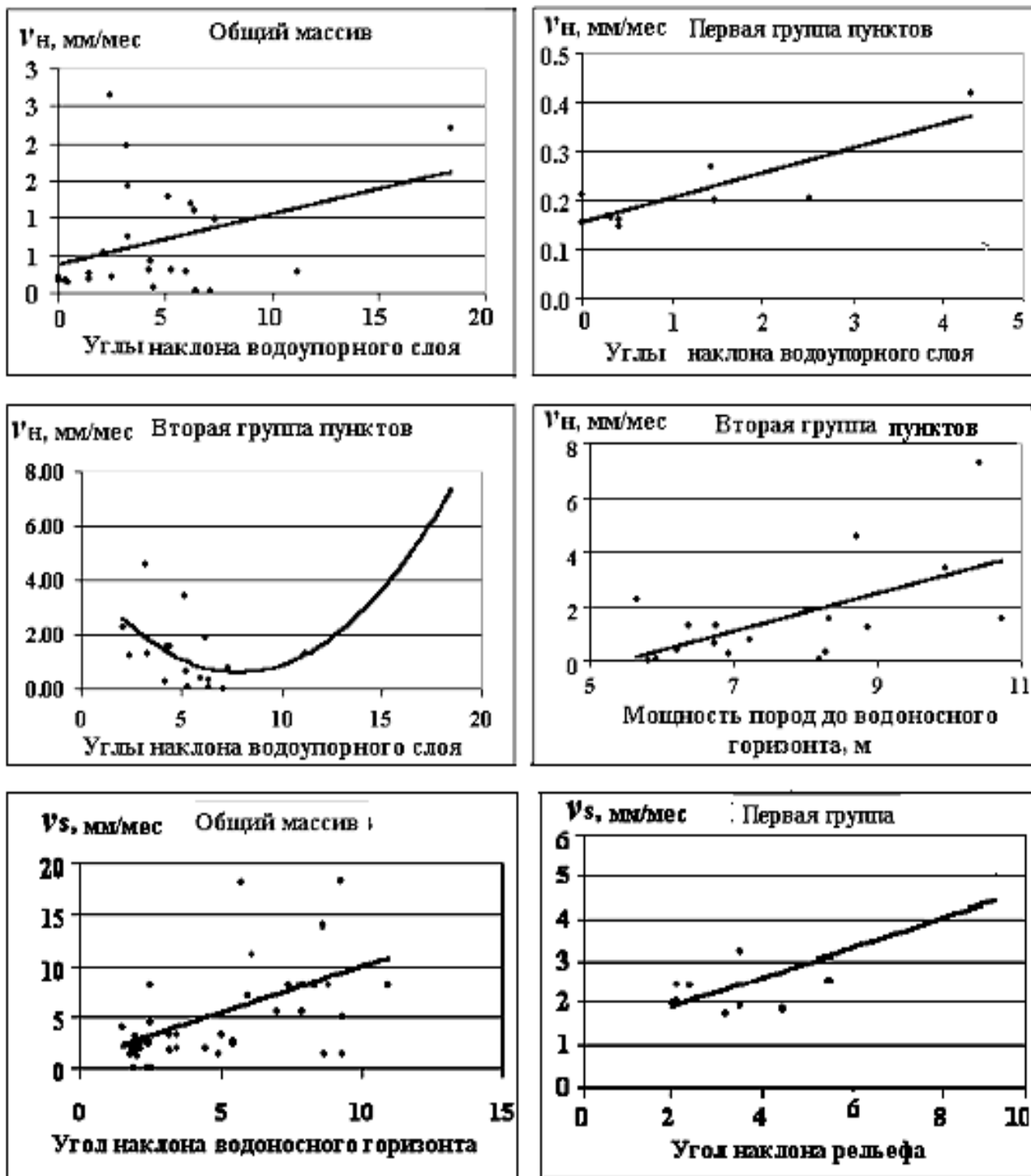


Рис. 5.6. Графики полей парной корреляции скорости и геометрии строения склона вертикальных и горизонтальных смещений на участке "Сокол"

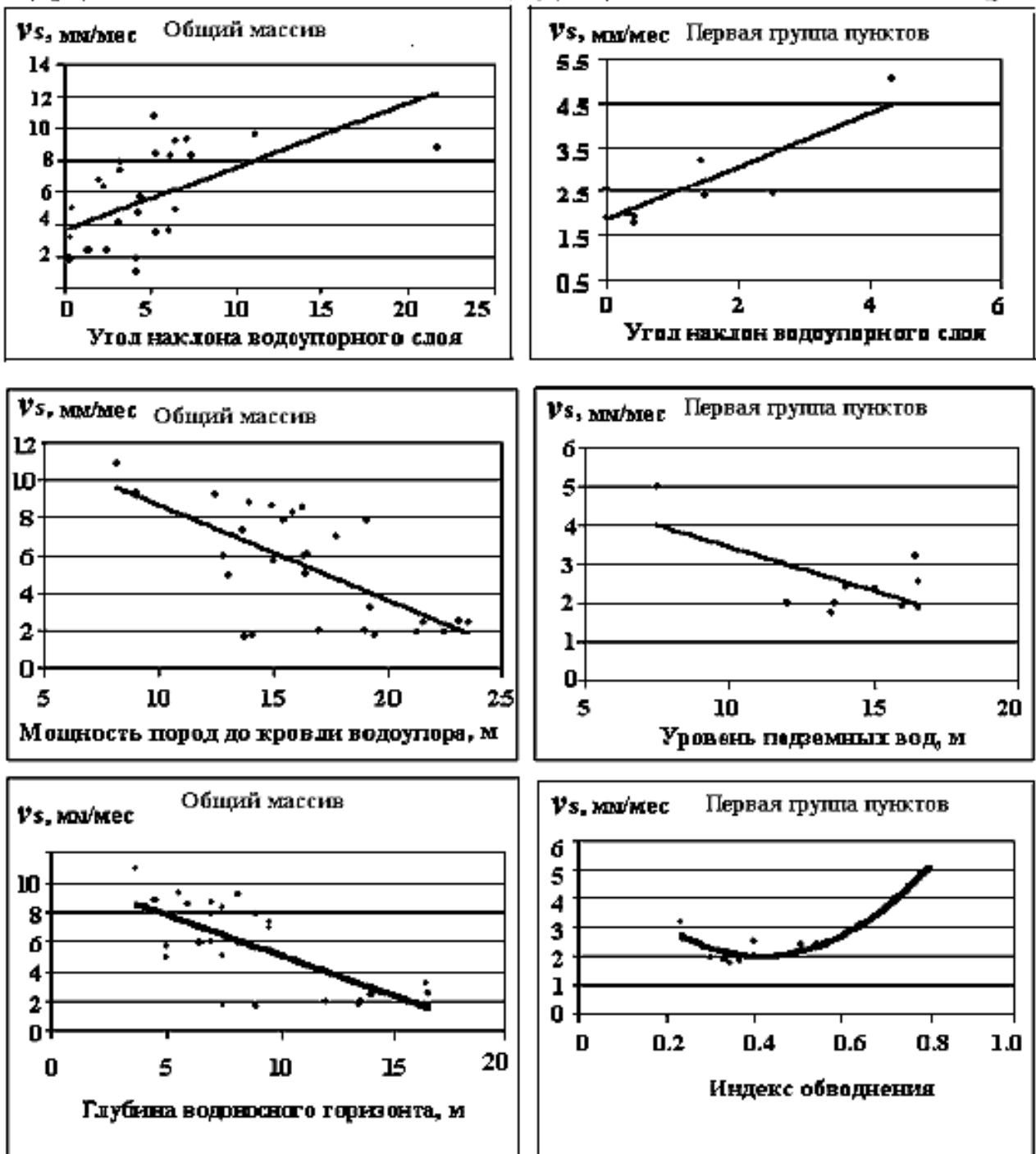


Рис. 5.7. Графики полей парной корреляции скорости горизонтальных смещений и геометрии строения склона на участке “Сокол”

На основании корреляционной взаимосвязи получены уравнения, которые являются адекватными математическими моделями (табл. 5.11).

Таблица 5.11

Взаимосвязь скорости смещений и геометрических параметров строения склона

Показатели	Тип связи	Уравнения регрессии	$r_{x,y}$
Первая группа пунктов. Угловые параметры геометрии склона			
Угол наклона водоупорного слоя	Линейная	$\vartheta_S = 1,822 - 0,613 \delta_{вг}$	0,865
Угол наклона водоносного горизонта	Параболическая	$\vartheta_S = 2,245 - 0,945 \delta_{вг} + 0,420 \delta_{вг}^2$	0,706
Угол наклона рельефа	Линейная	$\vartheta_S = 1,150 + 0,357 \delta_p$	0,809
Направление заложения водоупорного слоя	Параболическая	$\vartheta_S = 0,601 - 0,094 \alpha_{вс} + 0,02 \alpha_{вс}^2$	0,629
Вторая группа пунктов. Угловые параметры геометрии склона			
Угол наклона водоупорного слоя	Параболическая	$\vartheta_H = 3,066 - 0,689 \delta_{вс} + 0,046 \delta_{вс}^2$	0,832
Линейные параметры геометрии склона			
Мощность водоносного горизонта	Параболическая	$\vartheta_H = 1,957 - 0,628 p_{вг} + 0,062 p_{вг}^2$	0,630
Глубина водоносного горизонта		$\vartheta_H = 0,385 - 0,238 g_{вг} + 0,039 g_{вг}^2$	0,704
Уровень подземных вод		$\vartheta_H = 408,58 - 0,94 w_{ув} + 0,039 w_{ув}^2$	0,524
Совместная группа пунктов. Угловые параметры геометрии склона			
Угол наклона водоупорного слоя	Параболическая	$\vartheta_H = 0,172 - 0,002 \delta_{вс} + 0,013 \delta_{вс}^2$	0,910
Угол наклона рельефа		$\vartheta_H = 0,240 - 0,04 \delta_p + 0,006 \delta_p^2$	0,894
Направление заложения водоупорного слоя		$\vartheta_H = -0,805 - 0,009 \alpha_{вс} + 3 \cdot 10^{-5} \alpha_{вс}^2$	0,629
Линейные параметры геометрии склона			
Глубина водоносного горизонта	Параболическая	$\vartheta_H = 16,127 - 2,042 g_{вг} + 0,074 g_{вг}^2$	0,906
Мощность оползневого тела		$\vartheta_H = 3,559 - 0,323 p_{от} + 0,008 p_{от}^2$	0,660
Уровень подземных вод		$\vartheta_H = 2,071 - 0,267 w_{ув} + 0,009 w_{ув}^2$	0,607
Индекс обводнения		$\vartheta_H = 5,691 - 7,71 I_a + 21,335 I_a^2$	0,939

Приняты обозначения в уравнениях табл. 5.11: ϑ_H , ϑ_S – средняя скорость смещений; δ_{bc} , $\delta_{вг}$, δ_p , α_{bc} – угловые показатели геометрических параметров строения склонов; $p_{вг}$, $P_{от}$, $g_{вг}$, $w_{ув}$, I_a – линейные показатели.

5.3. Прогноз ожидаемых параметров оползневых процессов с учетом геометрии строения склонов

Полученные уравнения могут быть применены для прогноза возможных параметров оползневых смещений. На основании уравнений регрессии, которые являются моделями оползневого процесса, определены геометрические параметры строения оползневого склона, при которых возможны наименьшие смещения при линейной зависимости (табл. 5.12).

Таблица 5.12

Уравнения регрессии парной корреляции

Фактор, x_i	Уравнение регрессии $y = a + bx$	R^2	$F_{факт}$	$F_{крит}$	x_{min}
Угол наклона водоупорного слоя	$\vartheta_S = 1,822 + 0,613 \delta_{bc}$	0,749	61,22	3,98	2,30
Угол наклона рельефа местности	$\vartheta_S = 1,150 + 0,357 \delta_p$	0,654	16,66	3,98	2,51
Угол направления заложения кровли водоупорного слоя	$\vartheta_S = -0,794 + 0,020 \alpha_{bc}$	0,332	5,67	3,98	160
Глубина водоносного горизонта	$\vartheta_S = 6,515 - 0,269 g_{вг}$	0,404	6,088	3,98	24,80
Уровень подземных вод	$\vartheta_S = 48,427 - 0,392 w_{ув}$	0,293	7,444	3,55	123,62
Индекс обводнения	$\vartheta_S = 0,918 + 3,896 I_a$	0,457	7,581	3,98	0,24
Угол наклона водоупорного слоя	$\vartheta_H = 0,183 + 0,314 \delta_{bc}$	0,391	5,789	3,98	0,58
Угол направления заложения водоупорного слоя	$\vartheta_H = -1,783 + 0,01 \alpha_{bc}$	0,357	4,98	3,98	127,42
Уровень подземных вод	$\vartheta_H = 18,174 - 0,151 w_{ув}$	0,317	4,18	3,98	120,45
Глубина водоносного горизонта	$\vartheta_H = -0,068 + 0,949 g_{вг}$	0,471	16,03	3,55	5,34

Например, горизонтальные смещения могут возникнуть на застроенном оползневом склоне при угле наклона кровли водоупорного слоя 2,30, крутизне

рельефа $2,51^{\circ}$ и глубине водоносного горизонта 24,80 м. При углах наклона водоупорного слоя $0,58$, направлении заложения $127,42^{\circ}$ и абсолютной высоте уровня подземных вод 120,45 м возможны вертикальные смещения пунктов второй группы.

Горизонтальные смещения будут возникать в местах, где уровень подземных вод достигнет абсолютной высоты 123,62 м, а вертикальные – при глубине водоносного горизонта 5,34 м.

Таким образом, можно сделать вывод, что кинематические характеристики оползневых смещений зависят от формы и условий залегания лессовых пород склона.

На основании корреляционного анализа математических моделей установлены показатели геометрических параметров строения массива, при которых возможны оползневые смещения и определены параметры уравнений парной корреляции. Если углы наклона кровли водоупорного слоя и крутизны рельефа местности увеличатся на 1° , то скорость горизонтальных смещений пунктов, расположенных на застроенной территории водораздела, увеличится в среднем на 0,61 и 0,36 мм в месяц, соответственно и уменьшится на 0,27 мм в месяц при увеличении глубины водоносного горизонта на метр. Скорость вертикальных смещений увеличится в среднем на 0,31 мм/мес, если углы наклона кровли водоупорного слоя и рельефа местности на градус увеличатся.

При увеличении уровня подземных вод на метр скорость горизонтальных смещений точек на оползневом склоне (вторая группа пунктов) уменьшится в среднем на 0,39 мм/мес, а вертикальных – увеличится на 0,21 мм/мес (см. табл. 5.12).

Измерением тесноты связи между параметрами оползневого процесса и геометрическими параметрами строения склона с использованием параболической корреляции являются коэффициенты детерминации R^2 .

Минимальная средняя скорость вертикальных смещений пунктов второй группы происходит при достижении уровня подземных вод абсолютной отметки 123,62 м, т. е. 29,3 %; вариации вертикальных смещений зависят от уровня подземных вод. Прогнозируемые величины вертикальных и горизонтальных смещений определялись по уравнениям регрессии путем подстановки в них предполагаемых геометрических параметров строения сдвигающегося массива.

Доверительный интервал $(\hat{y}_p - \Delta\tilde{y}_p; \hat{y}_p + \Delta\tilde{y}_p)$ определялся по статистическим функциям СРЗНАЧ. ДИСПР. СТЬЮДРАСПРОБР [61], где $\Delta\hat{y}_i = t_{ak} \frac{S}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + (x_{1i} - \bar{x})^2 / D[x]}$ ($i = 1, \bar{n}$).

Поскольку относительно t-критерия Стьюдента между скоростью горизонтальных смещений и углами наклона кровли водоупорного слоя существует линейная зависимость, то уравнение $\hat{y} = 1,822 + 0,613x$ можно принять за модель с вероятностью 0,95, адекватной наблюдаемым данным. Для угла наклона кровли водоупорного слоя 5° прогнозная скорость смещений пунктов первой группы может достигнуть 5,17 мм/мес или 0,062 мм/год (медленная скорость).

С надежностью $p = 0,95$ прогнозное значение скорости горизонтальных смещений находится в пределах от 4,50 до 5,84 мм/мес (табл. 5.13, рис. 5.8).

Таблица 5.13

Прогноз скорости горизонтальных смещений пунктов первой группы с учётом угла наклона кровли водоупорного слоя

№ пункта	Средняя скорость горизонтальных смещений \mathcal{G}_S , мм/мес	Угол наклона кровли водоупорного слоя $\delta_{вс}$, град	Расчетные значения скорости (прогнозные), мм/мес	Доверительные границы скорости оползневых смещений, мм/мес		Средняя ошибка прогноза, %
				\mathcal{G}_{Smin}	\mathcal{G}_{Smax}	
45	2,53	0,5	2,01	1,70	2,32	12,2
44	2,39	1,47	2,70	2,45	2,95	10,4
43	2,42	1,52	2,73	2,49	2,98	10,2
46	1,88	0,5	2,01	1,71	2,32	16,4
47	5,01	4,32	4,71	4,11	5,31	12,0
48	3,72	3,41	4,07	3,62	4,51	12,0
42	3,20	1,44	2,68	2,43	2,92	7,70
41	1,52	0,42	1,96	1,64	2,28	20,9
40	1,98	0,32	1,89	1,56	2,22	16,6
39	2,01	0,29	1,87	1,53	2,20	16,6
38	1,92	0,41	1,95	1,63	2,27	16,6
Точечный прогноз		5,0	5,17	4,50	5,84	

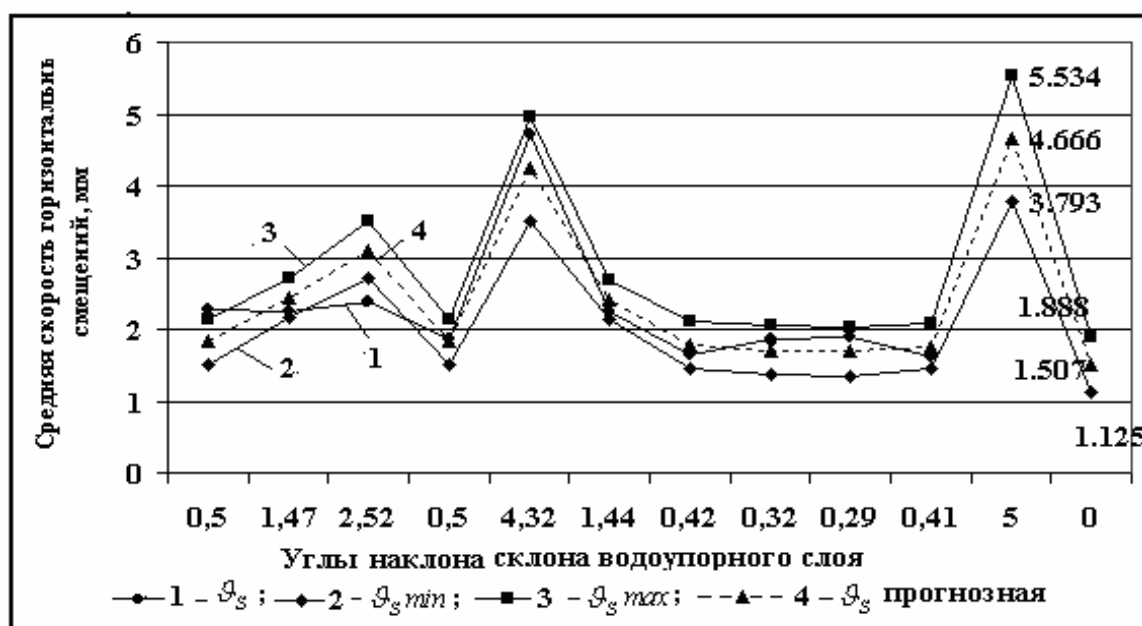


Рис. 5.8. График средней скорости горизонтальных смещений пунктов первой группы (1), доверительных границ (2 и 3); линии регрессии (4)

Аналогично можно спрогнозировать скорость горизонтальных смещений от угла наклона рельефа. Поскольку уравнение $y = 1,150 + 0,357 \delta_p$ является математической моделью, то с вероятностью $p = 0,95$ для угла 15^0 точечный прогноз средней скорости горизонтальных смещений точек на застроенной территории будет равен 7,50 мм/мес (табл. 5.14).

Таблица 5.14

Прогноз средней скорости горизонтальных смещений с учётом крутизны рельефа

№ пункта	Средняя скорость горизонтальных смещений \mathcal{G}_S , мм/мес	Крутизна рельефа δ_p , град	Расчетные значения скорости (прогнозные) \mathcal{G}_S , мм/мес	Доверительные границы скорости оползневых смещений, мм/мес		Средняя квадратическая ошибка прогноза, %
				\mathcal{G}_{Smin}	\mathcal{G}_{Smax}	
Пункты первой группы						
45	2,53	2,12	2,30	1,90	2,71	9,0
44	2,39	2,44	2,43	2,05	2,81	-1,7
43	2,43	2,12	2,30	1,90	2,71	5,2
46	4,19	4,46	3,23	2,91	3,59	22,5
47	5,01	9,28	5,19	4,34	6,05	-3,7
47a	3,72	5,7	3,75	3,32	4,18	-0,8
42	3,21	3,49	2,86	2,53	3,18	11,0
41	1,76	0,3	1,57	0,97	2,16	10,9
40	1,98	3,04	2,67	2,33	3,02	-15,0
39	2,00	2,18	2,33	1,93	2,73	-16,3
38	1,91	2,56	2,48	2,11	2,85	-22,8
Точечный прогноз		15	7,50	5,86	9,15	

Прогнозное значение скорости пунктов второй группы для угла наклона кровли водоупорного слоя 20^0 находится в пределах от 7,47 до 15,20 мм/мес. Изменение угла наклона водоупорного слоя на 1^0 вызовет изменение скорости и рельефа – 4,17 и 5,46 мм/мес соответственно (табл. 5.15).

Прогноз ожидаемой средней скорости горизонтальных смещений с учётом угла наклона кровли водоупорного слоя

№ пункта	Средняя скорость горизонтальных смещений ϑ_S , мм/мес	Угол наклона кровли водоупорного слоя $\delta_{вс}$, град	Расчетные значения скорости (прогнозные) ϑ_S , мм/мес	Доверительные границы скорости оползневых смещений, мм/мес		Средняя квадратическая ошибка прогноза, %
				ϑ_{Smin}	ϑ_{Smax}	
Пункты второй группы						
102	4,75	1,24	6,73	5,69	7,76	-21,6
103	5,47	3,35	7,06	6,24	7,89	-13,6
104	5,9	5,02	7,33	6,60	8,07	-16,2
110	5,92	6,42	7,56	6,83	8,28	-20,7
109	7,88	3,28	7,05	6,22	7,89	14,0
108	6,02	7,35	7,71	6,95	8,46	-21,4
111	7,88	2,4	6,91	6,00	7,89	16,1
112	6,96	3,22	7,04	6,20	7,88	-1,1
113	7,81	3,3	7,06	6,22	7,89	10,8
115	8,82	2,1	6,86	5,92	7,81	20,0
116	8,31	6,2	7,52	6,80	8,24	8,9
118	8,57	5,26	7,37	6,64	8,10	14,4
121	9,24	6,43	7,56	6,84	8,28	19,5
122	9,31	7,12	7,67	6,93	8,41	17,8
124	6,18	4,3	7,22	6,45	7,98	-11,1
125	7,88	18,43	9,48	7,38	11,58	-21,9
126	8,66	5,19	7,36	6,63	8,09	16,5
127	10,92	18,18	9,44	7,38	11,50	17,1
Точечный прогноз		20	9,33	7,47	15,20	

Главным источником ошибки точечного прогноза служит не столько неопределенность прогноза линии регрессии, сколько значительная зависимость оползневых смещений от других факторов, не входящих в уравнение регрессии. Поэтому применение корреляционно-регрессионного анализа дает возможность определить роль каждого фактора (прямое, непосредственное влияние; косвенное его влияние на другие факторы; совместное, влияние всех факторов) на скорость оползневых смещений.

5.4. Многофакторный корреляционно-регрессионный анализ

При решении этой задачи необходимо выделить основные параметры, определяющие развитие оползневого процесса естественных склонов из лессовых пород и расположения потенциально-оползневых участков. Задача решалась на основе применения многофакторного анализа, который позволяет свести к минимуму совокупности исходных показателей, характеризующие оползневые явления.

Многофакторная система требует множества показателей тесноты связей [68], т. е.

$$\hat{y} = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k = a + \sum_{i=1}^k b_i x_i + l_i,$$

где k – число факторных признаков; $x_i, a, b_1, b_2, \dots, b_n$ – определяющие коэффициенты регрессии; l – отклонение от закономерности развития процесса. Решая систему из k уравнений, получают значение коэффициентов условно чистой регрессии b_j . Свободный член уравнения вычисляется по формуле

$$a = \bar{y} - \sum_{i=1}^k b_j \bar{x},$$

где \bar{y}, \bar{x} – среднее значение показателей коэффициентов уравнения регрессии.

При многофакторном анализе рассматривалась связь между динамикой оползневых пунктов и геометрическими параметрами инженерно-геологических элементов строения склона. Эта связь представлена математическими моделями, которые связывают кинематические характеристики оползневого процесса и показатели геометрических параметров строения склона (табл. 5.16).

Из анализа уравнений множественной регрессии, приведенных в табл. 5.16, следует, что:

– скорость горизонтальных смещений пунктов первой группы в среднем увеличивается на 0,13 % при увеличении углов наклона водоупорного слоя на 1° , другие показатели влияют на изменение скорости очень незначительно. Скорость вертикальных смещений возрастает на 0,34, 0,25 и 0,19 % при увеличении угла наклона водоупорного, водоносного горизонта и рельефа на 1° ;

– отрицательная величина свободного члена в уравнении говорит о том, что скорость вертикальных смещений может остановиться и без нулевых значений угловых показателей геометрических параметров;

– средняя скорость вертикальных смещений пунктов первой группы уменьшается на 0,09 мм/мес при увеличении угла наклона водоупорного слоя и увеличивается на 0,9 мм/мес при увеличении наклона водоносного горизонта

на 1° (влияние угловых показателей на скорость вертикальных смещений исследованиями не установлено);

– скорость горизонтальных и вертикальных смещений пунктов первой группы увеличивается в среднем на 0,37, 0,88 % при увеличении на 1 м глубины и мощности водоносного горизонта и уменьшается в среднем на 1,83 мм/мес при увеличении мощности оползневого тела на 1 м;

– с увеличением глубины водоносного горизонта и уровня подземных вод средняя скорость вертикальных смещений пунктов второй группы увеличивается в среднем на 1,30 и 0,14 % и уменьшается на 0,14 % при увеличении мощности оползневого тела на метр. Отрицательная величина свободного члена говорит о том, что вертикальные смещения пунктов второй группы могут принимать нулевые значения.

Таблица 5.16

Многофакторные регрессионные модели смещений оползневого склона

№ пункта	Уравнения регрессии	R^2	$F_{факт}$	$F_{кр}$
Первая группа. Угловые показатели геометрических параметров				
1	$\mathcal{G}_S = 0,822 + 0,133 \delta_{вс} - 0,009 \delta_{вг} - 0,002 \delta_p - 0,001 \alpha_{вс} + 0,0012 \alpha_{вг}$	0,938	10,73	3,20
2	$\mathcal{G}_H = -1,247 + 0,345 \delta_{вс} + 0,254 \delta_{вг} - 0,189 \delta_p + 0,0076 \alpha_{вс} + 0,0028 \alpha_{вг}$	0,583	1,31	3,20
Вторая группа. Угловые показатели геометрических параметров				
3	$\mathcal{G}_S = 7,257 - 0,0904 \delta_{вс} + 0,092 \delta_{вг} - 0,003 \delta_p + 0,025 \alpha_{вс} - 0,027 \alpha_{вг}$	0,494	0,533	2,74
Первая группа. Линейные показатели геометрических параметров				
4	$\mathcal{G}_S = -90,356 + 0,380 g_{вг} - 2,163 p_{вс} - 0,021 p_{вг} + 0,780 w_{yв} + 24,383 I_a$	0,818	3,88	3,20
5	$\mathcal{G}_H = -108,927 + 0,360 g_{вг} - 1,478 p_{вс} - 0,195 p_{вг} + 0,964 w_{yв} + 13,732 I_a$	0,385	2,29	3,20
Вторая группа. Линейные показатели геометрических параметров				
6	$\mathcal{G}_H = -22,195 + 1,303 g_{вг} - 0,142 p_{вс} - 0,782 p_{вг} + 0,156 w_{yв} + 5,102 I_a$	0,713	2,92	2,74

Таким образом, проанализировав уравнения многофакторной регрессии, которые представляют математические модели оползневой процесса, следует, что положительные значения коэффициентов в уравнениях при параметрах $\delta_{вс}$, $\delta_{вг}$, $w_{ув}$ $w_{ув}$ и I_a говорят о существенном влиянии их на скорость горизонтальных и вертикальных смещений пунктов, расположенных в верхней застроенной части водораздельного плато.

Положительные значения коэффициентов при параметрах $\delta_{вс}$ показывают влияние водоупорного слоя (предполагаемой поверхности скольжения) на увеличение скорости смещений пунктов первой и второй групп.

Из вышеуказанного следует, что углы наклона водоупорного слоя и водоносного горизонта, глубина водоносного горизонта и уровень подземных вод являются наиболее влияющими на обводнение массива и интенсивность процесса оползневых смещений.

Адекватность полученных математических зависимостей оценивалась значением величины коэффициента множественной детерминации, который показывает тесноту связи оползневых смещений с геометрическими параметрами массива, входящими в уравнение регрессии.

Например, за счет пяти угловых геометрических параметров строения массива, включенных в многофакторное уравнение регрессии, объясняется 93,8 % зависимости скорости горизонтальных смещений пунктов первой группы и 49,4 – второй. За счет влияния тех же факторов объясняется зависимость средней скорости вертикальных смещений пунктов первой группы – 58,3. Пять линейных показателей геометрических параметров массива, включенные в уравнения регрессии, объясняют 81,8 % вариаций средней скорости горизонтальных смещений пунктов первой группы и 71,3 – второй и только 38,5 % – вертикальных смещений пунктов первой группы.

Прогноз скорости оползневых смещений выполнялся на основе регрессионных моделей. Расчет точечного прогноза скорости оползневых смещений и его доверительного интервала с заданной вероятностью основывается на подстановке в уравнение регрессии ожидаемых геометрических параметров строения склона (табл. 5.17, 5.18).

Прогноз средней скорости горизонтальных смещений пунктов первой группы с учётом геометрических параметров склона

№ пункта	Средняя скорость горизонтальных смещений ϑ_s , мм/мес	Показатели геометрических параметров					Расчетные значения, (прогнозные), мм/мес	Ошибка прогноза, %
		Угол наклона водопорного слоя $\delta_{вс}$, град	Угол наклона водоносного горизонта $\delta_{вг}$, град	Угол крутизны рельефа δ_p , град	Угол направления водопорного слоя $\alpha_{вс}$, град	Угол направления водоносного горизонта $\alpha_{вг}$, град		
	y	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	\hat{y}	
45	2,53	0,5	0	5,43	160	170	2,21	12,64
44	2,39	1,47	0	2,44	204	210	2,32	2,81
43	2,42	2,52	0	2,12	194	194	2,53	-4,73
46	1,86	0,5	1,75	4,46	165	165	2,20	-18,16
47	5,29	4,32	3,22	9,28	200	180	5,00	5,48
42	3,2	1,44	3,22	3,49	200	226	2,96	7,43
41	1,76	0,42	1,44	3,17	130	208	1,98	-12,22
40	1,98	0,32	3,04	2,03	170	207	2,01	-1,72
39	2,01	0,29	1,24	2,12	115	195	1,57	22,06
38	1,92	0,41	0	3,49	160	223	2,06	-7,16
Точечный прогноз		5	10	10	180	180	5,54	

Таблица 5.18

Прогноз средней скорости горизонтальных смещений пунктов второй группы с учётом показателей геометрических параметров склона

№ пункта	Средняя скорость горизонтальных смещений \mathcal{G}_S , мм/мес	Показатели геометрических параметров					Расчетные значения (прогнозные) \mathcal{G}_S , мм/мес	Ошибка прогноза, %
		Угол наклона водонепроницаемого слоя $\delta_{вс}$, град	Угол наклона водонесного горизонта $\delta_{вг}$, град	Угол крутизны рельефа δ_p , град	Угол направления водонепроницаемого слоя $\alpha_{вс}$, град	Угол направления водонесного горизонта $\alpha_{вг}$, град		
	y	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	\hat{y}	
103	3,37	5,35	1,44	7,08	180	200	5,74	-22,4
104	3,66	6,02	11,19	14,02	192	190	7,06	-22,9
110	6,39	6,42	8,08	21,48	198	198	6,38	0,2
109	8,25	3,28	7,08	6,2	180	183	6,72	18,6
108	6,75	7,35	5,43	5,43	193	193	6,96	-3,1
111	7,86	2,40	5,43	6,2	180	194	5,89	20,1
112	9,52	3,22	4,46	11,19	190	192	6,08	16,17
113	3,67	3,30	8,08	17,9	185	191	6,13	-17,1
115	8,09	2,10	8,08	9,28	203	200	6,00	20,8
116	8,31	6,25	8,11	1,3	205	211	6,34	13,7
118	5,72	4,45	18,26	11,0	39	180	5,46	4,6
119	9,25	6,43	18,43	9,0	220	182	8,65	6,5
121	9,32	7,12	1,43	9,28	225	180	7,72	17,1
122	8,77	18,43	8,13	9,28	239	180	10,24	-16,7
125	9,19	5,19	1,33	5,43	216	180	7,37	19,80
126	11,79	11,18	8,13	18,26	220	199	7,53	26,1
127	8,43	5,26	14,02	6,2	220	180	8,33	1,2
Точечный прогноз		6,16	8,01	9,41	193,12	190,29	6,73	
			10,00	10,00	10,00	193,00	190,00	7,13

5.5. Методика прогноза параметров оползневого процесса на основе кинематической модели

В обобщение выполненных исследований разработана схема прогноза параметров оползневых процессов на основе разработанной кинематической модели для ожидаемых геометрических параметров строения склонов (рис. 5.9, 5.10).

Методика прогноза параметров оползневых процессов естественных склонов
на основе кинематической модели

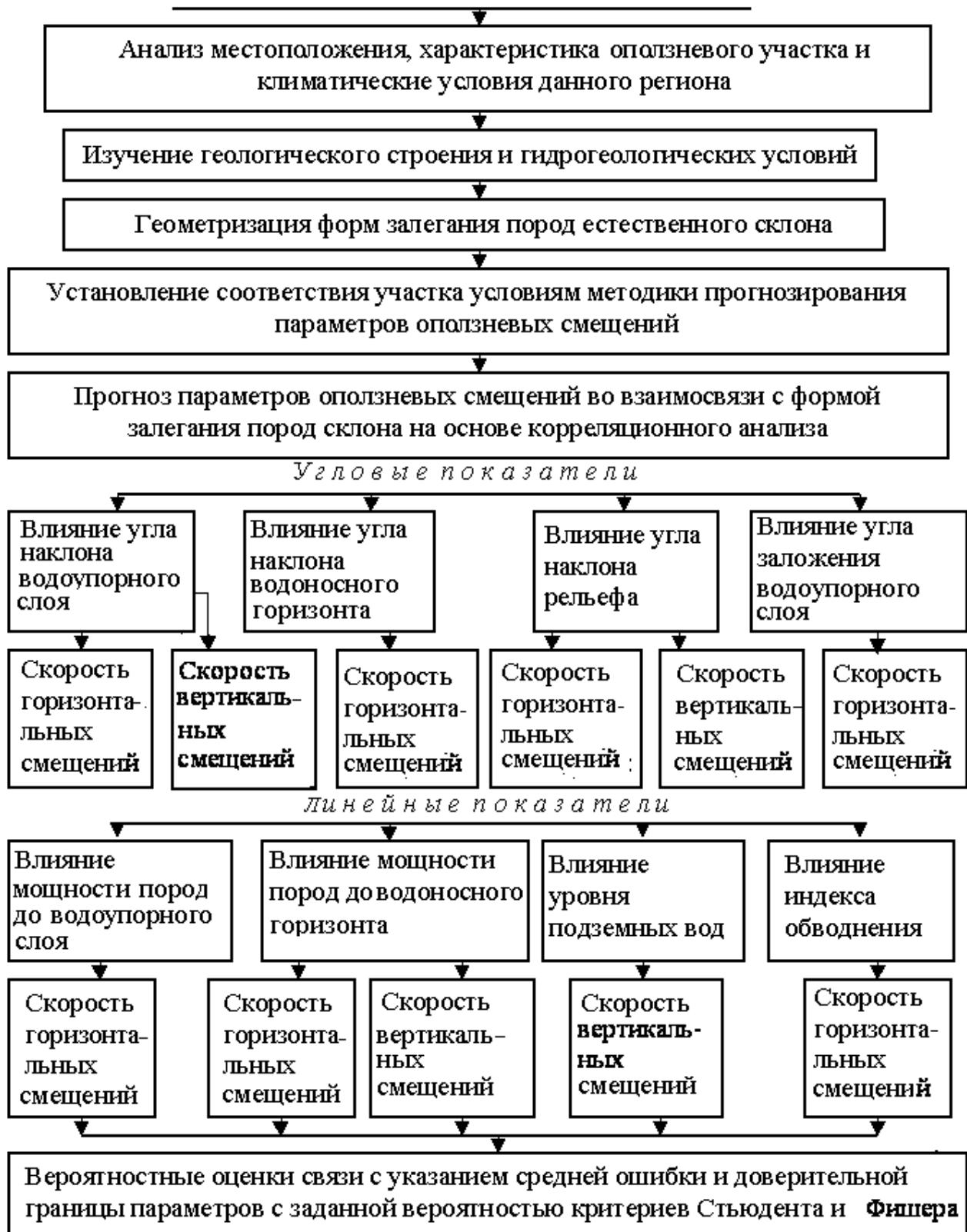


Рис. 5.9. Схема прогноза скорости оползневых смещений на основе корреляционного анализа

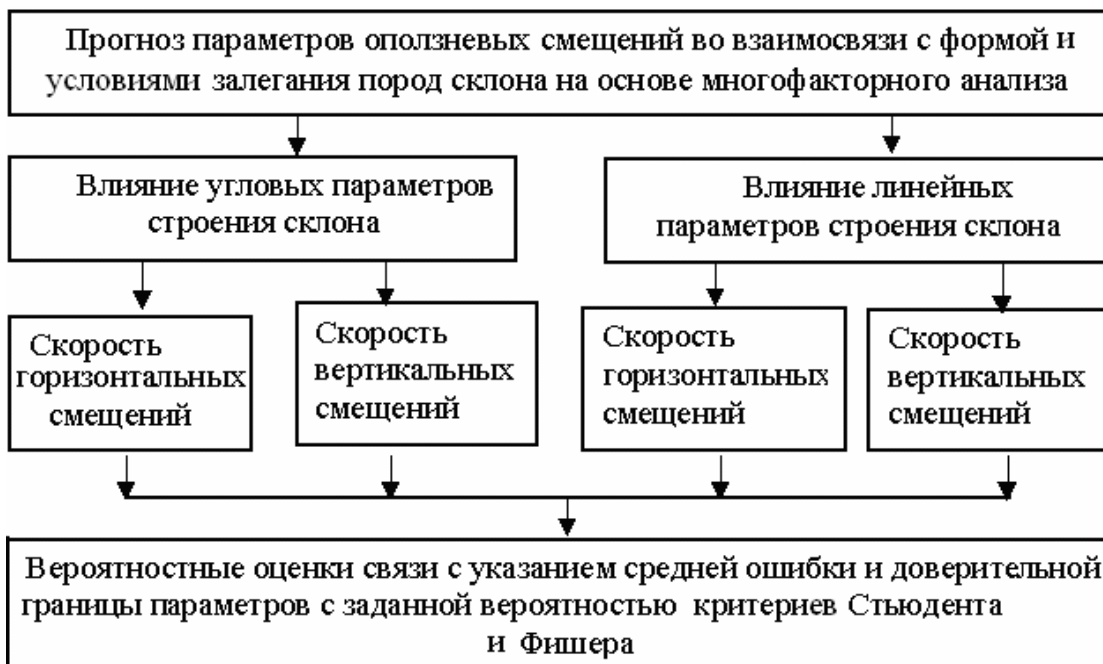


Рис. 5.10. Схема прогноза скорости оползневых смещений на основе многофакторного анализа

Прогноз ожидаемых параметров оползневых процессов при заданных геометрических параметрах строения склона выполняется в следующем порядке:

- по имеющимся инженерно-геологическим материалам исследуют местоположение объекта, физико-географические условия, геоморфологию, застройку территории и климатические условия;
- изучают геологическое строение и гидрогеологические условия объекта, устанавливают соответствие объекта исследований условиям методики прогнозирования параметров оползневых смещений.

При наличии сходства определяют ожидаемые кинематические характеристики смещений при заданных геометрических параметрах. Для этого:

1. Выполняют статистическую обработку геометрических параметров инженерно-геологических слоев по гипсометрическим планам. За основу всех расчетов и оценок берется либо выборка показателей точек, снятых с планов на основе геометрически правильной сетки, либо случайно расположенных, при этом используется формула:

$$z = f(x, y),$$

где z – значение показателя параметра в i -й точке; x, y – координаты точки в любой системе координат.

2. Значения геометрических параметров инженерно-геологических слоев, полученные по геологическим разрезам, представляют в виде гистограмм, которые показывают общее распределение показателей геометрии склона. По

виду гистограмм подбирают статистическую кривую, описывают ее уравнением и определяют закон распределения.

3. На основании полученных выборок точек статистических поверхностей определяют коэффициенты корреляции и строят корреляционные планы в изокоррелятах (линии, соединяющие равные коэффициенты корреляции), которые характеризуют пространственное соотношение геометрических параметров склона: водоупорного слоя, водоносного горизонта, рельефа, мощности оползневого тела, глубины водоносного горизонта и т.п. На основании корреляционных планов выполняется районирование объектов, где выделяют места возможных подвижек.

4. Используя метод геометризаци и компьютерное моделирование, путем вычитания или сложения поверхностей $z_i = f_i(x, y)$ и $z_j = f_j(x, y)$ изомощностей получают объем смещающегося оползневого тела, что позволяет предварительно рассчитать устойчивость склона и определить рациональные противооползневые мероприятия.

5. Вычисляют ожидаемые параметры оползневых смещений во взаимосвязи с формой залегания пород склона на основе однофакторного анализа. Поскольку полученные уравнения (табл. 5.16) с вероятностью $p = 0,95$ являются математическими моделями, то, подставив в уравнения определенные угловые и линейные показатели геометрических параметров строения данного склона, получают прогнозные скорости горизонтальных и вертикальных смещений.

6. Вычисляют ожидаемые скорости смещений на основе многофакторного анализа, подставив угловые и линейные показатели геометрических параметров в уравнения математических зависимостей (табл. 5.17, 5.18).

7. Определяют доверительные интервалы прогнозных значений по формулам:

$$\hat{y}_p - \Delta \bar{y}_i; \hat{y}_p + \Delta \bar{y}_i, \text{ где } \Delta \bar{y}_i = t_{ak} \frac{S}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{1 + (x_{1i} - \bar{x})^2 / D[x]}, (i = 1, \bar{n})$$

с использованием статистики средствами Excel функций СРЗНАЧ. ДИСПР. СТЬЮДРАСПРОБ

Выводы. Таким образом, на основании корреляционно-регрессионного анализа выявлены геометрические параметры строения массива, которые имеют наибольшее влияние на скорость смещений точек массива. Определены средняя скорость смещений при заданных геометрических параметрах массива и определены ожидаемые значения средней скорости горизонтальных и вертикальных смещений.

Разработанная методика прогноза ожидаемых параметров оползневых процессов на основе инженерно-геологического строения склонов позволяет с достаточно высокой достоверностью выявлять оползнеопасные места на естественных склонах, сложенных лессовидными породами.

Выполнено обоснование параметров кинематической модели для прогноза оползневых процессов естественных склонов, что позволяет проектировать противооползневые мероприятия и обеспечивать устойчивость территории.

Разработанная кинематическая модель сдвигающегося массива в виде взаимосвязи между параметрами оползневого процесса и формой залегания пород склона позволяет определять интенсивные места и направление движения оползня, прогнозировать его развитие, уточнять границы деформации склона и разрабатывать эффективные противооползневые мероприятия.

Список литературы

1. Шеко А.И. Закономерности формирования и прогноз селей / А.И. Шеко. – М.: Недра, 1980. – 296 с.
2. Шеко А.И. Изучение режима оползневых процессов / А.И. Шеко, Г.П. Постоев, В.В. Кюнцель. – М.: Недра, 1982. – 255 с.
3. Шеко А.И. Оползни и сели: в 2-х т. / А.И. Шеко. – М.: ЮНЕП/ЮНЕСКО, 1984. – Т. 1, 2.
4. Шеко А.И. Факторы формирования и развития оползней и селей / А.И. Шеко, В.С. Круподеров, И.В. Мельнева // Оползни и сели. Центр международных проектов ГКНТ. – М., 1984. – С. 16–51.
5. Сергеев Е.М. Инженерная геология / Е.М. Сергеев. – М.: МГУ, 1978. – 384 с.
6. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов / Е.П. Емельянова. – М.: Недра, 1972. – 308 с.
7. Оползни. Исследование и укрепление / под ред. Р. Шустера, Р. Кризека. – М.: Мир, 1981. – 368 с.
8. Шеко А.И. Современные геологические процессы на Черноморском побережье / А.И. Шеко. – М.: Недра, 1976. – 184 с.
9. Федоренко В.С. Горные оползни и обвалы, их прогноз / В.С. Федоренко. – М.: МГУ, 1988. – 214 с.
10. Клевцов И.А. Оползни Северного Кавказа, их типы, условия образования и меры борьбы с ними / И.А. Клевцов // Оползни и борьба с ними: тр. Северо-Кавказ. науч.-производ. семинара по изучению оползней и опыта борьбы с ними. – Ставрополь: Кн. изд-во, 1964. – С. 85–133.
12. Золотарев Г.С. Генетические типы оползней, их развитие и изучение / Г.С. Золотарев // Материалы совещания по изучению оползней и мер борьбы с ними. – К., 1964. – С. 165 – 170.
13. Гулакян К.А. О распознавании типов оползневых процессов / К.А. Гулакян, В.В. Кюнцель // Доклады совещания ученых к Международному конгрессу МАИГ. – М.: ВИНТИ, 1970. – С. 190 – 200.
14. Лужецкий А.Н. Изучение оползней на Украине / А.Н. Лужецкий, Л.С. Николаенко // Вопросы инженерной геодинамики. – Ташкент, 1978. – № 4. – С. 27–31.
15. Шадунц К.Ш. Механизм оползней-потоков в глинистых породах / К.Ш. Шадунц // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1976. – № 2. – С. 154–155.
16. Гольдштейн М.Н. Исследование оползней течения / М.Н. Гольдштейн // Вопросы геотехники. – Д., 1962. – № 5. – С. 3–23.

17. Гулакян К.А. О механизме глубоких оползней выдавливания / К.А. Гулакян // Тр. ВНИИ геологии и инженерной геологии. – 1968. – Вып. 8. – С. 33–41.
18. Некоторые закономерности формирования оползней и обвалов и вопросы комплексности исследований (на примере бассейна р. Зеравшан) / Г.С. Золотарев, А.В. Кожевников, Р.М. Никитин, В.С. Федоренко, И.Ф. Фиделли // Склоновые процессы: сб. ст. – М.: МГУ, 1974. – Вып. 1. – С. 5–41.
19. Ниязов Р.А. Оползни в лессовых породах юго-восточной части Средней Азии / Р.А. Ниязов. – Ташкент: ФАН, 1974. – 148 с.
20. Круподеров Ю.С. Использование данных режимных наблюдений для определения пороговых и критических значений факторов при прогнозировании оползней / Ю.С. Круподеров // Изучение режима экзогенных геологических процессов в районах интенсивного хозяйственного освоения: сб. науч. тр. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1988. – С. 35–47.
21. Букринский В.А. Сдвижение горных пород и земной поверхности при подземных разработках / В.А. Букринский. – М.: Недра, 1984. – 247 с.
22. Лужецкий А.Н. Об оценке влияния крутизны склонов при изучении экзогенных геологических процессов / А.Н. Лужецкий // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1980. – № 2. – С. 136–137.
23. Никитин Р.М. Закономерности обводнения горных оползневых склонов (на примере Юго-Западного Тянь-Шаня) / Р.М. Никитин И.Ф. Фиделли // Склоновые процессы: сб. ст. – М.: МГУ, 1978. – Вып. 3. – С. 29–33.
24. Коновалов А.А. О природе просадочности лессовых грунтов. Геоэкология / А.А. Коновалов // Инж. геология. Гидрогеология. Геокриология. – 1997. – № 1. – С. 90–96.
25. Шадунц К.М. Влияние усадочной трещиноватости на устойчивость склонов и откосов. (Образование оползней) / К.М. Шадунц, П.А. Ляшенко // Инженерная геология. – 1981. – № 2. – С. 41–51.
26. Исследование динамики смещений на естественных склонах в регионе Днепропетровска: отчет о НДР (заключ.) / Днепропетр. горн. ин-т; науч. рук. А.И. Осецкий; исполн.: П.Е. Курочкин, А.Г. Бондарук, А.И. Погорелов, В.А. Рябчий, А.В. Зуска [и др.]. – Д., 1993. – 152 с. – № ДР 0188u028880.
27. Котлов Ф.В. Антропогенные геологические процессы и явления на территории города / Ф.В. Котлов. – М.: Наука, 1977. – 171 с.
28. Котлов Ф.В. Изменение геологической среды под влиянием деятельности человека / Ф.В. Котлов. – М.: Недра, 1978.
29. Терцаги Крей. Теория механики грунтов / Крей Терцаги. – М.: Госстройиздат, 1961. – 507 с.
30. Березанцев В.Г. О расчете устойчивости песчаных откосов методами теории предельного равновесия / В.Г. Березанцев // Тр. ЦНИИС. – М.: Минтрансстрой, 1954. – Вып. 18.
31. Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии / Н.Н. Маслов. – М.: Высш. шк., 1968. – 619 с.
32. Тер-Степанян Г.И. О длительной устойчивости склонов / Г.И. Тер-Степанян. – Ереван: Изд-во АН Арм. ССР, 1961. – 54 с.

33. Соловьев Ю.И. Устойчивость откосов из гипотетического грунта / Ю.И. Соловьев // Тр. НИИЖТ. – Новосибирск, 1962. – Т. XXVIII. – С. 83–97.
34. Федоров И.В. Методы расчета устойчивости склонов и откосов / И.В. Федоров. – М.: Госстройиздат, 1962. – 125 с.
35. Шахунянц Г.М. К вопросу выбора рациональных методов расчета склонов / Г.М. Шахунянц // Оползни и борьба с ними: тр. Северо-Кавказ. науч.-производ. семинара по изучению оползней и опыта борьбы с ними. – Ставрополь: Кн. изд-во, 1964. – С. 34–46.
36. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов / Г.Л. Фисенко. – 2-е изд.. – М.: Недра, 1965. – 378 с.
37. Дорфман А.Г. Алгоритмы расчета устойчивости откосов по вариационному методу / А.Г. Дорфман; Днепропетр. ин-т инж. тр-та // Вопросы геотехники. – Д.: ДИИТЗ, 1970. – № 17. – С. 31–53.
38. Емельянова Е.П. О режиме устойчивости склонов и особенностях стадии развития оползней разных типов / Е.П. Емельянова // Тр. ВНИИ гидрогеологии и инженерной геологии. – 1970. – Вып. 29. – С. 43–75.
39. Емельянова Е.П. Сравнительный метод оценки устойчивости склонов и прогноза оползней / Е.П. Емельянова. – М.: Недра, 1971. – 104 с.
40. Гольдштейн М.Н. Проблемы расчета устойчивости грунтовых массивов / М.Н. Гольдштейн // Основания и фундаменты: сб. статей. – К.: Будівельник, 1976. – № 6.
41. Цветков В.К. Оценка и прогноз устойчивости оползневых массивов горных пород на основе анализа их напряженного состояния / В.К. Цветков // Горн. журн. – 1997. – № 8. – С. 10–13.
42. Демин А.М. Проблемы контроля устойчивости приоткосных массивов и пути их решения / А.М. Демин // Горн. журн. – 1997. – № 1. – С. 21–24.
43. Гулакян К.А. Прогнозирование оползневых процессов / К.А. Гулакян, В.В. Кюнцель, Г.П. Постоев. – М.: Недра, 1977. – 135 с.
44. Несмашний Є.О. Прогноз стійкості та оптимізація параметрів відкритих гірничих виробок з урахуванням їх деформованого стану: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.15.11 «Фізичні процеси гірничого виробництва» / Несмашний Євгеній Олександрович; Криворіз. техн. ун-т. – Кривий Ріг, 1999. – 35 с.
45. Николашин Ю.М. Прогноз устойчивости откосов и управление состоянием бортов глубоких карьеров: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.15.01. «Маркшейдерия» / Николашин Юрий Михайлович; Днепропетр. горн. акад. – Д., 2000. – 34 с.
46. Голуб В.В. Обоснование метода расчета устойчивости бортов карьеров, формируемых в массиве горных пород сложной структуры: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.15.09 «Механика грунтов и горных пород» / Голуб Виталий Владимирович; Днепропетр. горн. ун-т. – Д., 2004. – 176 с.
47. Шадунц К.Ш. Оползни-потоки / К.Ш. Шадунц. – М.: Недра, 1983. – 120 с.
48. Постоев Г.П. Классификация оползней по механизму нарушения равновесия массива пород / Г.П. Постоев // Изучение режима экзогенных геоло-

гических процессов в районах интенсивного хозяйственного освоения: сб. науч. тр. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1988. – С. 52–64.

49. Ниязов Р.А. Вопросы инженерной геодинамики / Р.А. Ниязов. – 1978. – № 4. – С. 59 – 61

50. Бырдин Б.И. К вопросу создания планового обоснования для наблюдений за оползнями / Б.И. Бырдин // Вопросы геодезического контроля точности и качества в строительстве – Куйбышев, 1980. – С. 20 – 21

51. Емельянова Е.П. Методическое руководство по стационарному изучению оползней / Е. П. Емельянова. – М., 1956. – 235 с.

52. Келль Н.Г. Определение смещений точек дифференциальным методом / Н.Г. Келль, А.Н. Белоликов. – М.: Углетехиздат, 1954. – 41 с.

53. Брайт П. И. Геодезические методы измерения смещений на оползнях / П.И. Брайт. – М.: Недра, 1965. – 113 с.

54. Тер-Степанян Г.И. Новые методы изучения оползней / Г.И. Тер-Степанян. – Ереван: Изд-во АН Арм. ССР, 1978. – 152 с.

55. Тер-Степанян Г.И. Геодезические методы изучения динамики оползней / Г.И. Тер-Степанян. – М.: Недра, 1979. – 151 с.

56. Постоев Г.П. Методы измерения оползневых смещений и их точность / Г.П. Постоев, А.Ф. Копылова // Тр. ВНИИ гидрогеологии и инженерной геологии, 1980. – № 134. – С. 24–28.

57. Григоренко А.Г. Измерение смещений оползней / А.Г. Григоренко. – М.: Недра, 1988. – 142 с.

58. Тихвинский И. О. Определение глубины подошвы оползней скольжения по материалам повторных геодезических наблюдений / И.О. Тихвинский // Вопросы геодинамики. – 1978. – № 4. – С. 67–73.

59. Тихвинский И.О. Контроль оползней / И.О. Тихвинский, Г.П. Постоев // Горн. журн. – 1997. – № 1. – С. 32–35.

60. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике / М.Я. Выгодский. – М.: Наука, 1977. – 872 с.

61. Елисеева И.И. Общая теория статистики / И.И. Елисеева, М.М. Юзбашев. – М.: Финансы и статистика, 1999. – 479 с.

62. Ценков Ц. Выбор модели для исследования движения оползней / Ц. Ценков // Геодезия, картография, землеустройство. – 1982. – № 1. – С. 17–20.

63. Емельянова Е. П. О применении методов статистики при изучении закономерностей оползневых процессов / Е.П. Емельянова // Материалы совещания по изучению оползней. – К., 1964.

64. Гулакян К.А. О принципах выбора опорных стационаров для целей прогноза оползневых процессов / К.А. Гулакян, В.В. Кюнцель, Г.П. Постоев // Тр. ВСЕГИНГЕО. – 1974. – Вып. 76. – С. 28–34.

65. Берлянд А.М. Образ пространства: карта и информация / А.М. Берлянд. – М.: Мысль, 1986. – 238 с.

66. Беспалова Е.Н. Влияние атмосферных осадков на развитие оползневого процесса в Среднем Приднепровье / Е.Н. Беспалова // Геологический журнал. – 2003. – № 2. – С. 103–106.

67. Гирс А.А. Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы / А.А. Гирс. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 230 с.
68. Толбатов Ю.А. Загальна теорія статистики засобами Excel / Ю.А. Толбатов. – К.: Четверта хвиля, 2003. – 218 с.
69. Рыжов П.А. Геометрия недр / П.А. Рыжов. – М.: Недра, 1964. – 500 с.
70. Букринский В.А. Геометризация месторождений полезных ископаемых / В.А. Букринский, Ю.В. Коробченко. – М.: Недра, 1977. – 526 с.
71. Осецкий А.И. Геометризация и горно-геометрический анализ пологоспадающих осадочных месторождений с прерывистым залеганием слоев: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.15.01. «Маркшейдерское дело» / Осецкий Александр Игнатьевич; Ленингр. горн. ин-т. – Л., 1970. – 36 с.
72. Несмашный Е.А. Оптимизация геометрических параметров открытых горных выработок / Е.А. Несмашный. – Кривой Рог: Минерал, 1999. – 118 с.
73. Гордеев В.А. Основы геометризации геотехнических условий разработки на карьерах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.24.01 «Маркшейдерское дело» / Гордеев Виктор Александрович; С.-Петербур. гос. горн. ин-т им. Г. В. Плеханова. – С. Пб., 1994. – 32 с.
74. Гордеев В.А. Районирование карьерных полей по физико-технологическим параметрам горных пород / В.А. Гордеев. – Свердловск: НТГО, 1988. – 59 с.
75. Кюнцель В. В. Составление мелкомасштабных карт прогноза периодов активизации оползней / В.В. Кюнцель, И.И. Сергеева // Тр. ВСЕГИНГЕО. – 1980. – Вып. 134. – С. 19–24.
76. Садовенко И.А. Обеспечение геотехнической устойчивости территорий в условиях развития оползневых процессов / И.А. Садовенко, В.П. Пустовойтенко // Сб. науч. тр. НГА Украины. – Д., 1998. – № 1. – С. 31–36.

Наукове видання

Зуска Ада Василівна

КІНЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗСУВНИХ СХИЛІВ

Монографія

(Російською мовою)

Редактор Ю.В. Рачковська

Підп. до друку 22.02. 2014. Формат 30x42/4.
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 7,8.
Обл.-вид. арк. 7,8. Тираж 30 пр. Зам. №

Підготовлено до друку та видруковано
в Державному вищому навчальному закладі
«Національний гірничий університет»
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
ДК № 1842 від 11.06.2004.

49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19