

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 528.2

*ЛАЗАРЕВ ВЛАДИМИР МИХАЙЛОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
Lazarevvm@mail.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

РАЗРАБОТКА ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ КОМПЛЕКСНОГО ГЕОМОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ АКТИВИЗАЦИИ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

В предлагаемой работе исследуются актуальные вопросы решения важной научно-технической проблемы развития и комплексного использования методов геодезического обеспечения геомониторинга природно-технических систем на оползнеопасных территориях с применением современных геодезических технологий для раннего предупреждения об активизации опасных природных и техноприродных процессов.

Ключевые слова: геодезический мониторинг, осадка фундамента, деформации, оползни, спутниковые технологии.

*LAZAREV, VLADIMIR MIKHAILOVICH, Cand. of tech. sc., assoc. prof.,
Lazarevvm@mail.ru
Tomsk State University of Architecture and Building,
2 Solyanaya sq., Tomsk, 634003, Russia*

DEVELOPMENT OF COMPLEX GEOMONITORING OF ENGINEERING STRUCTURES DEFORMATIONS DURING ACTIVIZATION OF LANDSLIDE PROCESSES ON THE URBANIZED TERRITORIES

The actual decision of the important scientific and technical problem of development and complex use of methods to ensure geomonitoring of natural-technical systems on landslide territories using modern geodetic technologies for the early prevention of activation of dangerous natural and techno-natural processes is considered in the given article.

Keywords: geodetic monitoring, deformations of engineering structures, the prediction of model deformations, geodetic measurements.

В последние годы, по данным МЧС России, количество чрезвычайных ситуаций природного и техноприродного происхождения непрерывно возрастает, что связано, с одной стороны, с ростом урбанизации, а с другой – с широким распространением и активизацией опасных природных и техноприродных процессов. Катастрофические процессы приводят к разрушению зданий и инженерных сооружений и представляют реальную угрозу для жизни людей. Поэтому вопросы раннего предупреждения об активизации опасных природных и техноприродных процессов для обеспечения геоэкологической безопасности урбанизированных территорий становятся все более актуальными, а природные катастрофы в России включены в число стратегических рисков. Принципы борьбы с ними изменились.

В основу новой стратегии обеспечения геоэкологической безопасности урбанизированных территорий положены три принципа: прогнозирование, своевременное предупреждение и управление природными опасностями, а не борьба с их последствиями. Реализация указанных принципов требует хорошего знания закономерностей и механизмов развития опасных явлений, поэтому одной из актуальных проблем обеспечения геоэкологической безопасности урбанизированных территорий является изучение состояния и устойчивости инженерных сооружений и самой геологической среды при активизации опасных процессов, исключительное значение при этом приобретает изучение оползневых процессов природного и техноприродного характера, а геодезический мониторинг дает пространственно-координатную основу для принятия управленческих решений.

Для прогнозирования ожидаемых чрезвычайных явлений и организации инженерной защиты от них для предотвращения опасных деформаций и разрушения строительных конструкций необходима организация современного комплексного геоэкологического мониторинга их развития во времени и пространстве. В связи с этим становится актуальным решение важной научно-технической проблемы развития и обоснования системы геодезического обеспечения геомониторинга для организации непрерывного пространственно-временного контроля за состоянием и развитием природно-технических систем, а сам мониторинг оползнеопасных территорий должен быть комплексным и обеспечить комплексный контроль как за инженерными сооружениями, так и за геологической средой, что требует теоретического обоснования объединения различных методов и технологий в рамках комплексного геомониторинга и их практической реализации.

Практическое применение результатов исследований оползнеопасных территорий и природно-технических систем (ПТС) на урбанизированных территориях геодезическими методами позволяет реализовать на практике комплексную программу геоэкологического мониторинга за ПТС для раннего предупреждения об активизации опасных процессов с целью организации инженерной защиты и предотвращения чрезвычайных ситуаций. Это особенно актуально для обеспечения геоэкологической безопасности крупных городов и, в частности, для г. Томска, на территории которого решением городского координационного экологического совета определено 33 оползнеопасные зоны, наиболее опасными из которых следует признать оползневой склон

в мкр. Солнечный и район Лагерного сада на берегу р. Томи. Развитие оползневых процессов на этих участках наносит огромный ущерб городскому хозяйству из-за деформации и разрушения существующих зданий и инженерных сооружений, что потребовало принятия на территории Томской области закона «Об оползневых зонах, расположенных в границах городских и сельских районов Томской области».

Проблема геоэкологического мониторинга оползневых процессов на урбанизированных территориях актуальна уже давно, но до окончательного ее решения еще далеко. Выполненный в работе анализ существующих методов, традиционно используемых для исследования оползневых процессов, показал, что технология применения как классических, так и современных спутниковых геодезических методов для контроля за оползневыми процессами имеет ряд особенностей и требует дальнейшего совершенствования, а оценку состояния и устойчивости ПТС необходимо решать в комплексе на основе системного подхода, который дает возможность своевременно выявить начало активизации оползневых процессов. Для контроля за развитием глубинных оползневых деформаций, за состоянием самого оползневого массива, его горизонтальными и вертикальными смещениями, а также за деформациями зданий и инженерных сооружений на склоне необходимо, кроме деформационного мониторинга и классических методов геодезии, применить еще и современные спутниковые геодезические технологии, и магнитометрические методы измерений глубинных оползневых деформаций, и методы статистического моделирования и математического прогнозирования. Это потребовало разработки теоретических и технологических основ объединения различных технологий измерений и методов статистического моделирования в рамках комплексной программы геоэкологического мониторинга, что в целом позволяет успешно решить поставленные выше проблемы прогнозирования, раннего предупреждения и управления опасными процессами, так как такая система уже приобретает новые свойства, становится технически более совершенной, результаты одного метода подтверждают результаты другого, значительно повышая достоверность установления закономерностей и прогноза развития опасных процессов, что необходимо для организации инженерной защиты и принятия управленческих решений.

Рассмотрим на примере г. Томска особенности применения традиционных методов геодезии для целей геодезического контроля за оползневыми процессами и их влиянием на состояние жилых домов, расположенных непосредственно на краю оползневого склона в мкр. Солнечный, на территории которого оползневые процессы резко активизировались в 1996 г. Активизация оползневых процессов вызвала не только смещение грунтового массива в мкр. Солнечный, на южном склоне которого располагаются два 10-этажных панельных жилых дома, но и разрушение капитальных гаражей, построенных в качестве поддерживающего сооружения в непосредственной близости от жилого дома № 89, две секции которого были признаны аварийными и расселены.

В процессе внедрения системы геодезического обеспечения комплексного геоэкологического мониторинга за оползнями южного склона мкр. Солнечный в г. Томске и расположенными на склоне 10-этажными панельными жилыми домами ранее была создана специальная опорная геодезическая сеть,

показанная на рис. 1, которая использовалась как каркасная основа системы геодезического обеспечения геомониторинга. Пунктами данной сети служат грунтовые реперы. В качестве исходных (опорных) приняты грунтовые реперы 15, 16, заложенные вне зоны оползневых процессов. Данная геодезическая сеть, опирающаяся на один базис – рп. 15 – рп. 16, является, по сути, висячей с наиболее слабым местом в ее конце – рп. 13, рп. 14. В связи с этим в северной части сети были заложены еще два опорных репера 17, 19, образующих второй базис. Для проверки устойчивости рп. 15, 16 заложены два репера 20, 21. Рп. 15, 16 приняты в качестве исходных, а координаты рп. 20, 21 определяются по схеме геодезического четырехугольника. Результаты измерений свидетельствуют об устойчивости всех опорных реперов в пределах погрешности их определения.

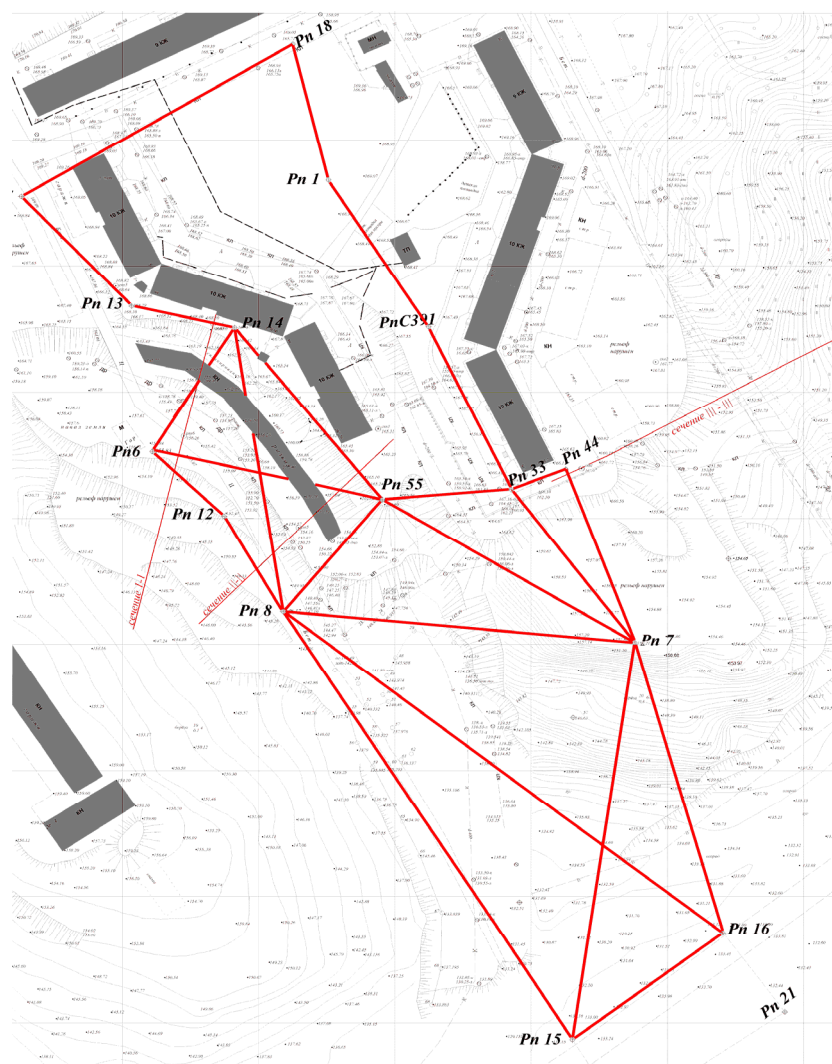


Рис. 1. Схема опорной геодезической сети для наблюдений за оползневым склоном и жилыми домами

Данная геодезическая сеть уравнивалась с использованием программы «АРМИГ-РС» как линейно-угловая. По результатам уравнивания получены следующие точностные характеристики: средняя квадратическая ошибка измерения угла по формуле Ферреро – $m_{\beta} = 4,02''$; средняя квадратическая ошибка единицы веса (направления) – $\mu = 2,36''$; максимальная средняя квадратическая ошибка стороны $m_s = 5,1$ мм. Результаты уравнивания показали, что расхождения координат δ_x и δ_y , определенных разными способами, для идентичных реперов не превышают погрешностей их определения. В табл. 1 для примера приведены средние квадратические погрешности m_x, m_y, m_{xy} определения координат и положения пунктов по результатам уравнивания только линейно-угловой сети, вычисленные специальной программой «АРМИГ-РС» по формулам

$$m_{x_j} = \mu \sqrt{Q_{x_j}}; \quad m_{y_j} = \mu \sqrt{Q_{y_j}}; \quad m_{xy_j} = \sqrt{m_{x_j}^2 + m_{y_j}^2},$$

где μ – ошибка единицы веса, характеризующая качество выполненных измерений; Q_{x_j}, Q_{y_j} – диагональные элементы весовой матрицы, характеризующей геометрию сети.

Таблица 1

Результаты уравнивания линейно-угловой сети

№ пунктов	Усл. коорд., X, м	δ_x	Усл. коорд., Y, м.	δ_y	m_x , мм	m_y , мм	m_{xy} , мм
7	451,416	5	287,069	3	4,0	1,8	4,4
8	462,018	4	462,964	7	4,4	4,6	6,4
55	507,206	5	197,172	5	5,5	4,0	6,8
6	525,435	6	111,518	9	6,4	6,4	9,1
14	574,396	8	140,713	8	8,1	5,8	10,0
13	584,217	10	104,188	11	8,6	7,1	11,2

Результаты уравнивания линейно-угловой сети: число направлений в сети – 34, измеренных сторон – 19, всех измерений – 53, необходимых измерений – 14, избыточных измерений – 39.

Согласно интервальной оценке точности, для истинных значений координат X, Y запишем

$$x - tm_x < X < x + tm_x,$$

$$y - tm_y < Y < y + tm_y,$$

где коэффициент t выбирают из таблиц распределения Стьюдента. Для числа степеней свободы в данной сети $r = 39$ и доверительной вероятности $P = 0,95$ он равен $t = 2,0$. Тогда для наиболее слабого места сети – гр. рп. 13 – при $m_x = 8,6$ мм, $m_y = 7,1$ мм (табл. 1) будем иметь

$$x - 17,2 \text{ мм} < X < x + 17,2 \text{ мм},$$

$$y - 14,2 \text{ мм} < Y < y + 14,2 \text{ мм}.$$

Отсюда следует вывод, что координаты пункта сети гр. рп. 13 от цикла к циклу могут изменяться в пределах 25–30 мм, а предельное значение средней квадратической ошибки положения пункта сети при $m_{xy} = 11,2$ мм равно $m_{\text{пред}} = tm_{xy} = 2 \cdot 11,2 \text{ мм} = 22,4 \text{ мм}$. То есть с доверительной вероятностью $P = 0,95$ следует ожидать попадания центра пункта при нанесении его на план по координатам, вычисленным в разных циклах наблюдений, в окружность погрешностей со средним радиусом $R = tm_{xy} = 2,2 \text{ см}$, иначе говоря, наибольший интервал, внутри которого вектор смещения репера можно считать случайным, зависящим только от погрешностей определения координат пунктов сети, определяется границами от -22 мм до $+22 \text{ мм}$ с доверительной вероятностью $P = 0,95$, а при $P = 0,997$ определяется соответственно границами от $-33,6 \text{ мм}$ до $+33,6 \text{ мм}$. Если при этом учесть, что реальная величина векторов перемещения в плане большинства реперов мала, то фиксируется резкое изменение направления смещения (до 180°), что и наблюдается на практике по результатам традиционных измерений.

Полагая точность измерений в разных циклах примерно одинаковой, трудно доказать, что точность определения абсолютной величины вектора планового смещения репера и его направления в геодезической сети одинаковы во всех циклах. В связи с тем, что координаты грунтовых реперов искажены неизбежными погрешностями измерений, определение величины и направления плановых смещений реперов по результатам наблюдений в соседних циклах при их небольших абсолютных значениях будет недостоверным. Это связано с тем, что в результате таких вычислений при отсутствии явных перемещений последние будут находиться в пределах окружности погрешностей определения положения пункта сети. Поэтому, если величина смещения репера меньше двойной погрешности определения положения пункта сети или незначительно превышает ее, то делать заключение о наличии смещения репера по незначительному изменению координат в двух смежных циклах нельзя. По этой же причине нельзя за начало вектора смещения репера принимать координаты, полученные только по результатам первого цикла наблюдений, так как нет никаких оснований считать первое измерение безошибочным.

В связи с этим для выявления действительных смещений реперов была разработана специальная методика, позволяющая выделить реальные перемещения реперов и отделить погрешности измерений от смещений реперов, используя центральные координаты $X_i^* = X_i - X_0$; $Y_i^* = Y_i - Y_0$, где координаты центра тяжести совокупности измеренных положений пункта в циклах наблюдений определяются по формулам

$$X_0 = \frac{x_1 m_1 + x_2 m_2 + \dots + x_n m_n}{nm}; \quad Y_0 = \frac{y_1 m_1 + y_2 m_2 + \dots + y_n m_n}{nm}. \quad (1)$$

По этим координатам и строятся графики изменения положения реперов с началом координат в точке (X_0, Y_0) . На графики накладываются окружности погрешностей с радиусами $R = tm_{xy} = 2m_{xy}$, вычисленные для каждого пункта сети. Если все точки последовательно попадают в окружность погрешностей, то нет оснований предполагать плановые смещения реперов, поэтому выбирается их центр тяжести (распределения), который и принимается за начало век-

тора смещения репера. Относительно этого центра тяжести и определяется явное смещение положения реперов по отношению к другим циклам наблюдений, если величина смещения превышает $R = 2m_{xy}$, в противном случае нет оснований предполагать плановые смещения реперов и координаты из таких циклов используются для уточнения реального положения пункта.

Для примера на рис. 2, 3 приведены результаты анализа горизонтальных перемещений гр. рп. 7 и 13 линейно-угловой сети, созданной на оползневом склоне в мкр. Солнечный г. Томска как по условным, так и по центральным координатам, то есть приведенным к центру распределения координат репера.

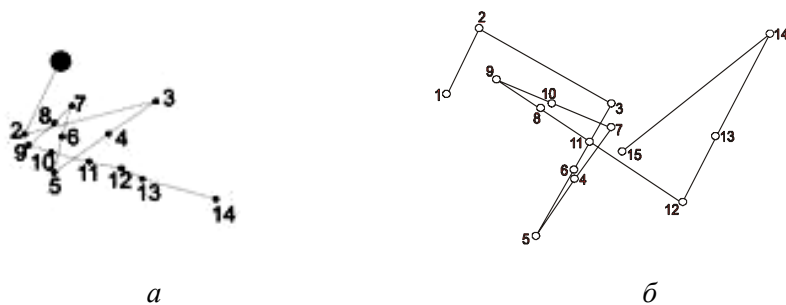


Рис. 2. Схема плановых перемещений гр. рп. 7 (а) и 13 (б) по условным координатам

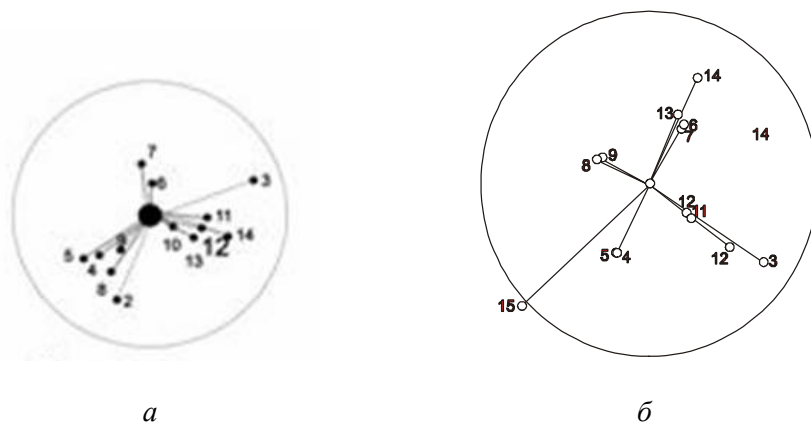


Рис. 3. Схема плановых перемещений гр. рп. 7 и 13 по центральным координатам:
 а – рп. 7, окружность погрешностей – 10 мм; б – рп. 13, окружность погрешностей – 20 мм

Таким образом, точность определения векторов смещения реперов традиционными способами путем использования метода триангуляции или линейно-угловых построений зависит от точности определения их координат, которая, в свою очередь, в существенной мере зависит от геометрии геодезической сети, расположения опорных пунктов в сети и их неподвижности и согласно табл. 1 изменяется от 8,8 до 22,4 мм. Это не позволяет получить надежных выводов о перемещении грунтового массива в непосредственной близости от жилых домов.

В связи с этим для наблюдений за оползневыми процессами в мкр. Солнечный были использованы спутниковые методы наблюдений с использованием GPS-приемников, которые позволяют определять пространственное положение объектов на земной поверхности на основе спутниковых геодезических (навигационных) систем. При этом спутниковая сеть, в отличие от традиционной геодезической сети, образует трехмерную пространственную систему с примерно равными по точности координатами. Этот метод дополняет и вытесняет такие классические методы, как полигонометрия, триангуляция, трилатерация и другие. Основным достоинством спутниковых методов измерения является их глобальность, оперативность, всепогодность, оптимальная точность и эффективность. Для измерений не нужна видимость между определяемыми пунктами. При высотах искусственных спутников Земли (ИСЗ) над горизонтом менее 10° ($Z > 80^\circ$) атмосферные задержки сигналов превышают 10 м. Поэтому из наблюдений исключались спутники с высотой над горизонтом $< 15^\circ$. В реальной антенне сдвиг по фазе зависит от направления на спутник, поэтому во всех циклах наблюдений антенна ориентировалась на север.

Наблюдения выполнялись наиболее точным, хотя и трудоемким способом статики. Точность статики зависит от продолжительности измерений и достигает до 1 мм в плане и 2 мм по высоте. Обычно продолжительность наблюдений на паре станций составляла около одного часа. За это время происходило накопление измерений, выполняемых через интервал в 1 секунду. Базисные линии и пространственное положение пунктов опорной линейно-угловой сети определялись в системе геоцентрических координат WGS-84 с использованием комплекта GPS-приемников Legacy-E, (L1+L2), фирмы JAVAD POSITIONING SYSTEMS (США). По результатам измерений формировались разности из наблюдений на станциях, а затем по разностям, свободным от многих искажений, вычислялся соединяющий эти станции вектор D:

$$D = (X_B - X_A, Y_B - Y_A, Z_B - Z_A)^T.$$

Точность определения наклонных дальностей (длин векторов) между базовыми и определяемыми пунктами, как показано в табл. 2, составила порядка 0,6 мм (предельная – 1,8 мм).

Таблица 2

Solution 'Session' PROCESSED VECTORS (Distance-Azimuth-Elevation)*

№ п/п	Stations from – to	Coordinates			Sigmas (mm)		
		Distance (m)	Azimuth	ELEVATION	s(D)	s(A)	s(E)
1	Reper 2 – reper 1	376,7312	280°20'31,98"	–0° 446,22"	2,5	3,2	6,2
2	Reper 2 – reper 3	279,3495	114°29'31,03"	0°1948,38"	0,6	0,6	1,2
3	Reper 2 – reper 4	533,2533	121°12'38,82"	0°11'36,88"	0,4	0,6	1,3
Mean weight matrix's estimations					0,6	0,7	1,5

* Таблица сформирована ПО Pinnacle для обработки спутниковых измерений.

Азимуты (углы) и превышения измерялись с точностью 0,7–1,5" (предельная погрешность 2,1–4,5"). Результаты измерений смещений реперов 7 и 13 приведены на рис. 4, где все точки, характеризующие смещения реперов 7 и 13, находятся в пределах окружности с радиусом 5–6 мм, что подтверждает ранее сделанные выводы о стабильном положении этих реперов, и только в последних циклах наблюдений зафиксированы реальные подвижки реперов.

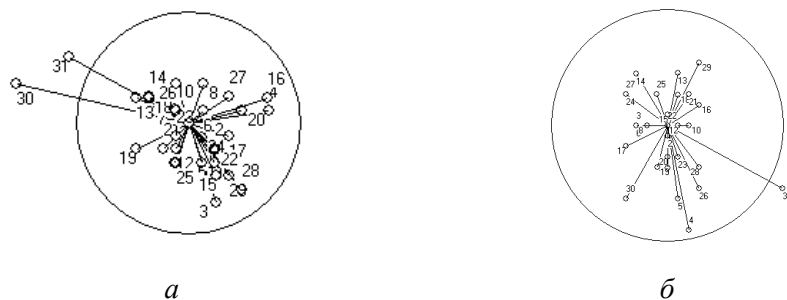


Рис. 4. Графики горизонтальных перемещений рп. 13 (а) и рп. 7 (б) по результатам спутниковых измерений

Для контроля и для случаев, когда применение спутниковых методов невозможно или затруднено, часть элементов сети (углов и расстояний) измерялась традиционными методами геодезии. Для определения плановых перемещений грунтовых (наблюдательных) реперов во время слежения за оползневыми процессами необходимо перейти от геоцентрической системы координат WGS-84 к местной системе плоских прямоугольных координат на плоскости. Дальнейшие исследования позволили на основе анализа изменения пространственного положения центра тяжести совокупности измеренных положений пункта в циклах наблюдений, как показано на рис. 5, разработать и впервые применить на практике новую методику выявления тренда в медленных смещениях грунтовых реперов с использованием формул (1) на базе как классических, так и спутниковых измерений, что позволило увеличить точность определения координат пунктов опорной сети в несколько раз и значительно уменьшить время и стоимость наблюдений.

Данная методика позволяет оценить случайные погрешности измерений и влияние геометрии опорной геодезической сети на точность определения величины и направления смещения грунтовых реперов и выявить реальные деформации сети. Достоверность результатов исследований подтверждается внедрением предложенных методов и моделей в систему геодезического обеспечения геоэкологического мониторинга оползневых процессов на территории г. Томска.

Как видим, новая методика оценки стабильности пунктов, в отличие от ранее применяемой традиционной методики, показанной на рис. 2, позволяет однозначно выявить не только наличие, но и особенности деформационного процесса, как показано на рис. 4. Деформационный мониторинг строительных конструкций также подтверждает активное развитие оползневых и вызванных ими деформационных процессов.

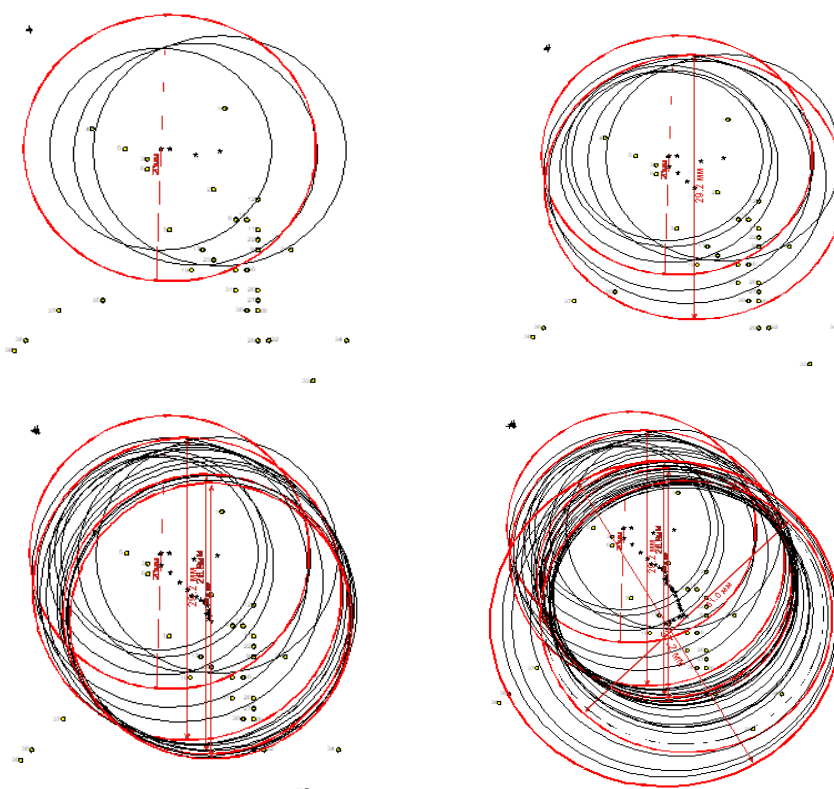


Рис. 5. Оценка стабильности положения пункта опорной геодезической сети при наблюдении за оползневыми процессами

На развитие оползневых процессов, наряду с природными, большое влияние оказали и техногенные факторы. Строительство жилых домов привело к пригрузке оползневого склона и изменению напряженно-деформированного состояния грунтового массива. Техногенное обводнение грунтового массива привело к появлению технического водоносного горизонта, снижению прочности и устойчивости грунтов. Как показали результаты расчетов [1], коэффициенты устойчивости неосушенного склона составили 0,96–1,09, а в случае осушения коэффициент устойчивости возрастает до 1,19–1,333. В качестве мероприятий по стабилизации ситуации в мкр. Солнечный было предложено произвести работы по осушению склона и строительству подпорного удерживающего сооружения, а также продолжить наблюдения в системе мониторинга, который ведется на данной территории с 1995 года.

Результаты деформационного мониторинга за вертикальными перемещениями фундаментов жилого дома № 91 показаны на рис. 6. Из приведенных данных видно, что к настоящему времени стабилизация не достигнута и требуется внедрение комплекса мероприятий по укреплению грунтовых оснований и повышению устойчивости склона. Об опасном состоянии склона свидетельствуют и результаты магнитометрических наблюдений с применением аппаратуры АМКОД.

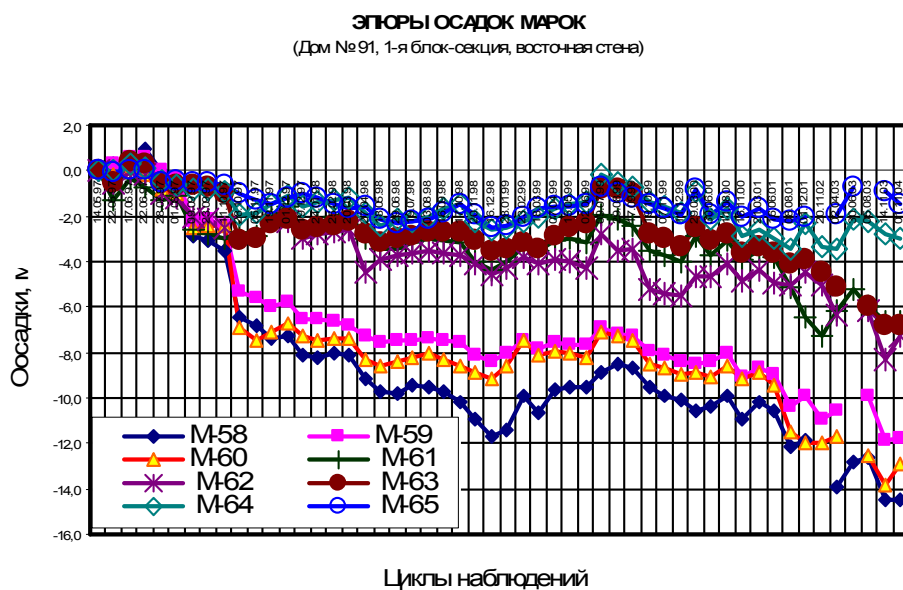


Рис. 6. Результаты наблюдений за вертикальными перемещениями строительных конструкций жилого дома № 91

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- оползневые процессы на территории г. Томска продолжают активно развиваться, чему в значительной степени способствует интенсивное техногенное воздействие на геологическую среду;
- развитие этих процессов приводит к нарушению динамического равновесия в эксплуатации природно-технических систем и возникновению чрезвычайных ситуаций;
- для стабилизации ситуации на этих территориях потребуются разработка и внедрение комплекса мероприятий по инженерной защите, а для контроля за состоянием природно-технических систем в процессе их эксплуатации – дальнейшее внедрение и развитие комплексного геоэкологического мониторинга оползневых процессов.

Таким образом, на практике было доказано, что геодезический мониторинг является важнейшей составляющей системы геодезического обеспечения геоэкологического мониторинга, поскольку обеспечивает его пространственно-временную привязку, являясь координатной основой, и позволяет определить факторы, влияющие на состояние и развитие природно-технических систем. Разработанная комплексная технология геодезического контроля за оползневыми процессами и деформациями инженерных сооружений на оползневом склоне была применена в процессе реализации системы геодезического обеспечения геоэкологического мониторинга на территории г. Томска [1] и доведена до практических рекомендаций при решении градостроительных задач и корректировке генерального плана застройки города Томска с учетом развития опасных природных и техноприродных процессов, непосредственно влияющих на обеспечение геоэкологической безопасности при-

родно-технических систем на урбанизированных территориях в процессе их эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ольховатенко, В.Е.* Опасные природные и техноприродные процессы на территории г. Томска и их влияние на устойчивость природно-технических систем / В.Е. Ольховатенко, М.Г. Рутман, В.М. Лазарев. – Томск : Печатная мануфактура, 2005. – 152 с.