РАЗДЕЛ X. ГЕОЛОГИЯ

Баборыкин М.Ю.¹, Жидиляева Е.В.²

Методологические подходы проведения мониторинга физико-геологических процессов и явлений воздушным лазерным сканером (lidar), основанные на распознавании геоморфологических образов процессов и явлений

¹Южно-Российский Государственный Политехнический Университет
(Новочеркасский Политехнический Институт) им. М.И. Платова
(Россия, Новочеркасск)

²Кубанский Государственный Университет
(Россия, Краснодар)

doi: 10.18411/scienceconf-05-2019-39

idsp: scienceconf-05-2019-39

Аннотация

В данной статье рассматриваются методологические подходы к мониторингу опасных геологических процессов на основе воздушного лазерного сканирования. Целью данной статьи является: демонстрация возможности проведения мониторинга опасных геологических процессов. Задачи, решаемые в статье: представление теории создания статической модели, формульное описание набора данных разновременных массивов точек лазерных отражений и набор данных мониторинга. Выстраивание статических моделей во временные ряды для получения динамических моделей в практике. Объектом исследования является рельеф местности с точки зрения среды расположения будущего линейного технического сооружения. Предметом – экзогенные геологические процессы, которые могут быть опасными для будущего линейного технического сооружения во время эксплуатации и как следствие могут спровоцировать техногенную катастрофу. Приведены примеры применения данных подходов на реальных объектах.

Ключевые слова: мониторинг опасных геологических процессов и явлений; качественные и количественные характеристики опасных геологических процессов и явлений; статическая модель; динамическая модель; экзогенные геологические процессы; LiDAR.

Abstract

This article discusses the methodological approaches to the monitoring of hazardous geological processes based on airborne laser scanning. The purpose of this article is: to demonstrate the possibility of monitoring hazardous geological processes. The problems solved in the article: the representation of the theory of creating a static model, a formulaic description of a data set from a variety of arrays of laser reflection points and a set of monitoring data. Distribution of static models by time series for obtaining dynamic models in practice. The object of the study is the terrain from the point of view of the future environment of the linear technical structure. The subject of research is exogenous geological processes that may be dangerous for the future pipeline or other construction of a linear structure and their infrastructure during operation and as a result may lead to a technological catastrophe. Examples of application of these approaches on real objects are given.

Key words: monitoring of hazardous geological processes; qualitative and quantitative characteristics of hazardous geological processes; static model; dynamic model; exogenous geological processes; Lidara

ВВЕДЕНИЕ

Проведение мониторинга на трубопроводах необходимо для его нормального эксплуатации. Следовательно, на стадиях проведения инженерно-геологических изысканий и проектировании учитываются негативные факторы, воздействующие на трубопроводы, которые могут привести к аварийным ситуациям и экологической катастрофе.

Выявление опасных геологических процессов и явлений по данным воздушного лазерного сканирования, выполняемого для построения топографических планов, позволяет не только экономить временные и финансовые ресурсы при проведении инженерных изысканий, но и получить статическую модель (нулевую) для проведения будущего мониторинга «геологических процессов». Следовательно, целью проведения воздушного лазерного сканирования является не только построение воздушного лазерного сканирования, но и использование полученных материалов во всём цикле инженерных изысканий, а именно, дешифрирование экзогенных геологических процессов (ЭГП) – как начальная стадия проведения геодинамического мониторинга и непосредственное «системные» наблюдения за «процессами», получившими статус – опасные геологические процессы.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОВЕДЕНИЯ МОНИТОРИНГА

Система мониторинга опасных геологических процессов на трубопроводах строится с учётом достижения конечной цели – оптимизации управления природно-технической системой, основанной на базе прогнозных оценок её развития за счёт выработки оптимальных рекомендаций и как следствие управленческих решений [10].

Проведение мониторинга на основе данных воздушного лазерного сканирования возможно при условии соблюдения некоторых аспектов (Способ проведения геотехнического мониторинга линейных сооружений и площадных объектов на основе воздушного лазерного сканирования, патент № 2655956) – качество лазерного сканирования, разрешение фотосъёмки, приблизительно аналогичных погодных условий и схожим состоянием объекта (наличие листвы и травяной растительности приблизительно в равной степени) при повторном сканировании. Ссылаясь на требования получения качественной модели местности для построения топографического плана определённого масштаба, к примеру, М 1:1000, необходимо при повторном сканировании получить модель местности, соответствующую требованиям построения аналогичного масштаба. Учитывая погрешности в требованиях, предъявляемых к цифровым моделям местности, учитываются погрешности при построении динамических моделей из разновременных статических моделей местности [17].

Построение статической модели местности и рельефа производится из массива точек лазерных отражений (ТЛО). Каждая точка лазерного отражения характеризуется пятью параметрами – тремя пространственными координатами X , Y , Z , интенсивностью отражения I и временем регистрации t .

Раскрывая вопрос о воздушном лазерном сканировании, особо подчёркивается, что это не что иное, как дальномерная форма представления местности синтезированное при помощи электронно-вычислительной машины соответствующее распределению в координатном пространстве трёхмерного массива лазерных точек. Термин «лазерная точка» используется здесь и в дальнейшем для обозначения единичного первичного лазерно-локационного измерения. Т.е. важнейшими численными параметрами, характеризующими каждую лазерную точку, являются значения пространственных координат X_p , Y_p , Z_p в некоторой заранее заданной системе координат. Распределение лазерных точек образует пространственный образ объекта съёмки, который доступен визуальному анализу, проведению пространственных измерений и применению вычислительных методов геоморфологического анализа. Такой образ и составляет то, что принято называть лазерно-локационным изображением в дальномерной форме.

Наряду с пространственными координатами точки объектового пространства, вызвавшего отражение лазерного импульса, современные лидары способны регистрировать интенсивность отражённого импульса I , т.е. значение энергии импульса, вернувшейся на приёмник излучения [12, 14]. Забегая вперёд, укажем, что эта доля зависит от многих факторов, среди которых двунаправленная спектральная отражательная способность объекта, фактическое значение дальности, величины пропускания, рассеивания и собственного излучения атмосферы и другие параметры. Однако с практической точки зрения важно то, что лазерно-локационное изображение в форме интенсивности по своим информационным свойствам чрезвычайно близко к естественным черно-белым фотографиям (аэрофотоснимкам в случае воздушного применения), что позволяет успешно использовать их для целей визуального распознавания объектов и камерального дешифрирования даже без привлечения традиционных аэрофотосъёмочных данных.

Исходя из того, что исходными данными для построения математической модели рельефа являются данные отражения от поверхности Земли, т.е. положение точки в пространстве [7], имеющие трехмерную матрицу в математическом исполнении, машинное восприятие отличается ввиду работы с двоичными кодами. Отсюда следует, что аппаратно-программное восприятие рельефа, в отличие от человеческого, как правило, обусловлено двумерной сеточной областью с высотной величиной в каждом узле этой области. Математическое представление данной модели выглядит следующим образом:

$$\overline{\text{Point}} = \begin{bmatrix} \text{point}_{0,0} & \dots & \text{point}_{0,j} & \dots & \text{point}_{0,Ny+1} & \dots & \text{point}_{0,Ny} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{point}_{i,0} & \dots & \text{point}_{i,j} & \dots & \text{point}_{i,Ny+1} & \dots & \text{point}_{i,Ny} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{point}_{Nx+1,0} & \dots & \text{point}_{Nx+1,j} & \dots & \text{point}_{Nx+1,Ny+1} & \dots & \text{point}_{Nx+1,Ny} \\ \text{point}_{Nx,0} & \dots & \text{point}_{Nx,j} & \dots & \text{point}_{Nx,Ny+1} & \dots & \text{point}_{Nx,Ny} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Где $\text{point}_{i,j}$ – высота на пересечении i -ой и j -ой линии двумерной горизонтальной сеточной области. Если узел попадает за пределы водоёма линии, то $\text{point}_{i,j}=0$, в противном случае узел характеризуется записью – высотная отметка. Для получения трёхмерной сеточной области необходимой для визуальной интерпретации и последующей математической обработки получения данных изменения рельефа, необходимо перейти от двумерной сеточной области высот рельефа к трёхмерной сеточной области.

Делая вывод что, массив точек лазерных отражений выстраивается в сетчатую модель имеющую выше указанный набор численных значений в теории возможно производить корреляцию аналогичной модели, выстроенной из массива «лазерных точек» с другим временным интервалом.

Для того, чтобы закончить формальное описание лазерно-локационных данных, дополним уже введённый набор численных параметров Xp , Yp , Zp , I , характеризующих каждую лазерную точку значением t – время регистрации данной лазерной точки. В результате появляется возможность формально определить такое понятие, как набор лазерно-локационных данных, а именно:

$$L = \{Xpi, Ypi, Zpi, Ii, ti\} \quad i=1 \dots N \quad (2)$$

где L – означает весь рассматриваемый набор лазерно-локационных данных,

N – общее количество лазерных точек в наборе L ,

i – количество точек лазерных отражений в статической модели.

Следовательно, набор данных мониторинга M формально следует определить как:

$$M = \{L, L + \Delta Tj\} \quad j=1 \dots K \quad (3)$$

K – Общее количество режимных наблюдений в процессе мониторинга,

T – модель во временном ряду,

j – количество точек лазерных отражений в динамической модели.

Исходя из этого, формирование синтезированных моделей динамики поверхности склонов во времени производится на основе цифровых моделей местности, отсканированных в разное время. Математическое сравнение цифровых моделей рельефа даёт представление об изменении рельефа во времени. Производится простое математическое вычитание объёмной матрицы (массива точек) принятой начальной точкой отсчёта из другой объёмной матрицы (массива точек) следующей во временном ряду. Полученная информация представляет собой объёмную матрицу с показателями дельты двух объёмных матриц (массива точек).

Рассмотрев выше вопрос о том, что аппаратно-программные средства работают с бинарными кодами, объёмную матрицу массива точек следует представить в виде, матрицы, которая имеет бинарную разметку (рельеф – 1, водоём и отсутствие съёмки – 0):

$$\overline{\text{Grid}} = \begin{bmatrix} \bar{H}_{0,0} & \dots & \bar{H}_{0,j} & \dots & \bar{H}_{0,Ny} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{H}_{i,0} & \dots & \bar{H}_{i,j} & \dots & \bar{H}_{i,Ny} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \bar{H}_{Nx,0} & \dots & \bar{H}_{Nx,j} & \dots & \bar{H}_{Nx,Ny} \end{bmatrix} \quad (4)$$

где $\bar{H}_{i,j}$ – матрица, математически описывающая пространство рельефа по высоте на пересечении i -ой и j -ой линий трёхмерной сеточной области.

Следовательно, получение значений изменений в рельефе при вычете разновременных моделях матриц с бинарными отметками будет иметь вид:

$$\overline{\text{Grid}}_n - \overline{\text{Grid}}_0 = \Delta \overline{\text{Grid}} \quad (5)$$

Где n – последующий скан во временном ряду, 0 – скан, принятый за нулевую точку отсчёта во времени. Или:

$$\begin{bmatrix} n\bar{H}_{0,0} & \dots & n\bar{H}_{0,j} & \dots & n\bar{H}_{0,Ny} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ n\bar{H}_{i,0} & \dots & n\bar{H}_{i,j} & \dots & n\bar{H}_{i,Ny} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ n\bar{H}_{Nx,0} & \dots & n\bar{H}_{Nx,j} & \dots & n\bar{H}_{Nx,Ny} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0\bar{H}_{0,0} & \dots & 0\bar{H}_{0,j} & \dots & 0\bar{H}_{0,Ny} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0\bar{H}_{i,0} & \dots & 0\bar{H}_{i,j} & \dots & 0\bar{H}_{i,Ny} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0\bar{H}_{Nx,0} & \dots & 0\bar{H}_{Nx,j} & \dots & 0\bar{H}_{Nx,Ny} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\bar{H}_{0,0} & \dots & \Delta\bar{H}_{0,j} & \dots & \Delta\bar{H}_{0,Ny} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta\bar{H}_{i,0} & \dots & \Delta\bar{H}_{i,j} & \dots & \Delta\bar{H}_{i,Ny} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta\bar{H}_{Nx,0} & \dots & \Delta\bar{H}_{Nx,j} & \dots & \Delta\bar{H}_{Nx,Ny} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Формирование модели с показателем интенсивности показывает зоны поглощения лазерного отражения от поверхности. При проведении классификации, выделив класс «поверхность земли» с показателем интенсивности, устойчиво фиксируются кромки водных объектов под растительностью, а также замоченные грунты в однородном массиве, при условии выхода грунтов или их расположения в первых сантиметрах от дневной поверхности (при условии использования лазера в ближнем инфракрасном диапазоне). При использовании лазерных сканеров с несколькими лазерами разных цветов (к примеру, одна из новейших разработок – мультиспектральный сканер имеющих три лазера с частотами 532, 1064, 1550 nm) появляется возможность более качественного выше указанных показателей [18].

Так как интенсивность является крайне неустойчивым показателем и на данный момент проводятся испытания применения интенсивности для решения некоторых инженерно-геологических задач и набор статистических данных для выработки четкого алгоритма применения данных. На сегодняшний день применение показателя интенсивности является экспертным и полностью зависит от опыта и профессионализма дешифровщика. Однако в математическом выражении матрица данных выглядит следующим образом:

$$I_GRID = \begin{bmatrix} I \equiv \bar{H}_{0,0} & \dots & I \equiv \bar{H}_{0,j} & \dots & I \equiv \bar{H}_{0,Ny} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ I \equiv \bar{H}_{i,0} & \dots & I \equiv \bar{H}_{i,j} & \dots & I \equiv \bar{H}_{i,Ny} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ I \equiv \bar{H}_{Nx,0} & \dots & I \equiv \bar{H}_{Nx,j} & \dots & I \equiv \bar{H}_{Nx,Ny} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Следовательно, получение значений изменений в рельефе с учетом интенсивности при вычете разновременных моделей матриц с бинарными отметками будет иметь вид:

$$I_GRID_n - I_GRID_0 = \Delta I_GRID \quad (8)$$

Некоторые программные продукты, работающие с данными лазерных сканеров и функцией, преобразования интенсивности в псевдоцветовые настраиваемые палитры позволяют визуально, для экспертной работы, проводить анализ. Эффективность применения интенсивности в динамических моделях в виду отсутствия необходимого количества статистических испытаний в разных климатических условиях при разных полетопригодных условиях и времени года не выявлена, в виду неоднозначности получаемых результатов.

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА МОНИТОРИНГА

Мониторинг опасных геологических процессов и явлений, условно, начинается с поиска экзогенных геологических процессов, их классификации по видам, классификации по возможному негативному воздействию на будущее сооружение, т.е. присвоение класса «опасный геологический процесс» и проведении выборки из полученного массива классифицированных данных для систематизации.

Учитывая выше рассмотренные аспекты формирования цифровых моделей местности и рельефа, следует отметить, что небольшие изменения рельефа или начала разрушения склона в зоне распространения «опасных геологических процессов» на первых стадиях активизации обычно не заметны. Однако комплексный подход позволяет получить весьма обстоятельную информацию об опасных геологических процессах, как в самом начале его возникновения, так и на стадии полного развития [8, 11, 13, 14, 16, 25, 26](рис. 1).

Рис. 1. Принципиальная схема мониторинга на основе воздушного лазерного сканирования совмещённого с аэрофотосъёмкой. Верхняя точка пирамиды является началом познания изучаемого объекта. Постепенно увеличивая свои познания об объекте, происходит увеличения основания пирамиды.

Косвенное начало проведения мониторинга опасных геологических процессов – это обнаружение, выявление (дешифрирование) экзогенных геологических процессов,

определение их опасности для будущего сооружения, т.е. присвоение им статуса опасные геологические процессы [1, 4].

Учитывая, что на сегодняшний день, повсеместно применяется лазерное сканирование при проведении геодезических изысканий на линейных и площадных объектах, появляется возможность использования полученной цифровой модели местности не только для построения планшетов и карт, но и для геологической интерпретации изучаемой местности (рис 2.).

Рис. 2. Интерпретация условий на цифровой модели рельефа.

1 – цирк оползня; 2 – бровка главного уступа; 3 – главный уступ; 4 – вершина оползня; 5 – внутренний уступ; 6 – неровности поверхности рельефа (валы, бугры и т.д.); 7 – подошва оползня; 8 – переработка берега горной рекой (боковая эрозия постоянного водотока); 9 – линейная эрозия (донная эрозия временного водотока); 10 – линейная эрозия (боковая эрозия временного водотока); 11 – конус выноса (пролювий).

В соответствии со сканированием местности для определённого масштаба можно производить распознавание «геоморфологических образов» того или иного опасного геологического процесса. Сканирование для масштаба 1:500 позволяет выявить: оползни; обвалы и осыпи; сели; карст; карстово-суффозионные процессы; лавины снежные; переработка берегов морей, озёр, водохранилищ; суффозия; морозное пучение; термокарст. А съёмка для масштаба 1:5000 - выделение границ крупных тел оползней, крупных осыпей и обвалов, селевых бассейнов, курумов имеющих большую площадь, проявление термокарста имеющую большую площадь (таблица 1) [5, 21, 22, 23, 24, 25, 26].

Таблица 1.

Дешифрируемые опасные геологические процессы и явления

Регистрируемые процессы и явления	Выделяемые элементы
М 1:500, разрешение фотоснимков на местности от 5-7 см в пикселе плотность точек земли – от 5-9 точек на кв.м. высокая детализация съёмки, чётко фиксируются границы опасных геологических процессов и явлений, проявленных в рельефе:	
оползни	бровки срыва, цирк оползня, язык оползня, рвы отседания, ступенчато-глыбовая поверхность, валы выпирания и наплывы, откосы обрушения и размыва, бугры, западины. Оконтуривание всего тела оползня и т.д.
обвалы и осыпи	поверхность отделения обвалившейся массы, размеры и формы, уклоны, области транзита и т.д.
сели	формы водосборного бассейна и русла, задернованность склона и т.д.
карст	карры, западины, воронки, карстовые блюдца, увалы и т.д.
карстово-суффозионные процессы	воронки, крупные блюдца, западины
лавины снежные	соответствующие формы рельефа, снегосборные карово-эрозионные воронки и т.д.
переработка берегов морей, озёр, водохранилищ	пляжи, береговые бары, томболы или переймы, пересыпи, косы, стрелки, клифы
суффозия	просадочные явления – блюдца, воронки, западины

Регистрируемые процессы и явления	Выделяемые элементы
морозное пучение	коренные пучины (высота достигает 30-40 см), рельеф, обеспечивающий наилучший водоотвод, уменьшает возможность возникновения пучин. Верховные пучины до 5-10 см при неблагоприятных условиях не выделяются
термокарст	провальные, просадочные явления, натёчные образования (гейзериты и травертины) и явления связанные с мерзлотой (курумы, солифлюкция и т.д.)
М 1:1000, разрешение фотоснимков на местности от 7-10 см в пикселе плотность точек земли – от 3-5 точек на кв.м. с худшей детализацией:	
оползни	бровки срыва, цирк оползня, язык оползня. Оконтуривание всего тела оползня
обвалы и осыпи	поверхность отделения обвалившейся массы, размеры и формы, уклоны, области транзита. Оконтуривание осыпи и обвала
сели	формы водосборного бассейна и русла, задернованность склона. Оконтуривание селевого бассейна
карст	воронки, карстовые блюдца
карстово-суффозионные процессы	воронки, крупные блюдца, западины
лавины снежные	соответствующие формы рельефа, снегосборные карово-эрозионные воронки
переработка берегов морей, озёр, водохранилищ	пляжи, береговые бары, томболы или переймы, пересыпи, косы, стрелки, клифы
суффозия	просадочные явления – крупные блюдца, воронки, западины
термокарст	провальные, просадочные явления, натёчные образования (гейзериты и травертины) и явления связанные с мерзлотой (курумы, солифлюкция и т.д.)
М 1:2000, разрешение фотоснимков на местности от 10-15 см в пикселе плотность точек земли – от 2-3 точки на кв.м. плохая детализация:	
оползни	бровки срыва, цирк оползня, язык оползня. Оконтуривание всего тела оползня
обвалы и осыпи	поверхность отделения обвалившейся массы, размеры и формы, уклоны, области транзита. Оконтуривание осыпи и обвала
сели	формы водосборного бассейна и русла. Оконтуривание селевого бассейна
лавины снежные	(соответствующие формы рельефа, снегосборные карово-эрозионные воронки
карст	воронки, карстовые блюдца
термокарст	провальные, просадочные явления и явления связанные с мерзлотой большой протяженности (курумы, солифлюкция и т.д.)
переработка берегов морей, озёр, водохранилищ	пляжи, береговые бары, томболы или переймы, пересыпи, косы, стрелки, клифы
М 1:5000, разрешение фотоснимков на местности от 15- 20 см в пикселе, плотность точек лазерных отражений классификации «Земля» – от 0.5 - 1 точку на кв.м. Выделение границ крупных тел оползней, крупных осыпей и обвалов, селевых бассейнов, курумов имеющих большую площадь, проявление термокарста имеющую большую площадь, проявление карста имеющую большую площадь и т.д.	

Полученная статическая геолого-геоморфологическая модель является нулевой точкой мониторинга опасных геологических процессов и явлений.

Выстраивание во временной ряд статических геолого-геоморфологических моделей позволяет получить динамические модели, фиксирующие геометрические изменения склона. Верификация моделей с геологическими данными полученными, либо при дистанционном изучении местности, либо при полевом изучении позволяет получить наиболее достоверный результат, учитывая, что при полевом изучении достоверность выше.

После проведения мониторинга возможна передача данных проведённого мониторинга на основе воздушного лазерного сканирования для компиляции данных глобальной системой мониторинга на государственном уровне, так как общая структура мониторинга на основе воздушного сканирования включает в себя подсистемы регионального, локального и детального уровней. На детальные уровне-режимные наблюдения, включающие обследование состояние трубопровода и анализ развития различных инженерно-геологических процессов вдоль трубопровода [2, 9, 10].

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ СХЕМА ПРАКТИЧЕСКОГО ПРОВЕДЕНИЯ МОНИТОРИНГА

Возвращаясь к вопросу, что главной целью мониторинга является прогноз развития системы и принятия на его основе рекомендаций и решений по управлению рассматриваемой системой, отмечается то, что достижение главной цели мониторинга невозможно без эффективной организации наблюдений. Необходимо применение эффективных методик и технических средств наблюдений, обеспечивающих сбор информации для последующего анализа и оценки состояния системы, установления тенденции развития соответствующей системы как основы принятия управленческих решений [3, 9]. К методам и средствам наблюдения в системе мониторинга предъявляются достаточно высокие требования, их проведение должно основываться на рациональной технико-методической базе и научном обосновании, а также они должны отвечать принципам рациональной пространственно-временной организации процесса мониторинга [11, 13].

Эффективная технико-методическая база режимных наблюдений в системе геодинамического мониторинга должна обеспечивать:

- получение качественных и количественных характеристик системы и оценку изменений их во времени;
- установление закономерностей развития процессов и явлений и выявление причин их обуславливающих;
- предупреждение опасных и катастрофических проявлений процессов;
- составление прогноза развития процессов и опасных явлений;
- обоснование необходимых мероприятий по охране геологической среды, обеспечению устойчивости сооружений, управлению геологическими процессами и явлениями.

Исходя из этого, выстраивается концептуальная схема проведения всего цикла работ, распознавание опасных геологических процессов, полевая заверка (фотоотчёт) и проведение мониторинга (рис. 3).

Рис. 3. Концептуальная схема проведения мониторинга (распознавание опасных геологических процессов, полевой заверки и проведения мониторинга). Черным пунктиром обозначен экзогенный геологический процесс, который не наблюдался при проведении мониторинга, но по накопленному материалу может быть прослежена динамика на динамических моделях.

В практическом применении итоговый материал выглядит следующим образом: полученную статическую модель местности и рельефа верифицированную с геологическими данными сравниваем с последующими статическими моделями местности, получая количественную информацию об изменении во времени рельефа. Геологические данные служат главным дополнением в познании изучаемого объекта, выявлении причин появления изменений в грунтах определённого генетического типа имеющего определённые физико-механические свойства.

После проведения процедуры математического вычета разновременных цифровых моделей рельефа путём программно-аппаратных средств производится построение изолиний изменений рельефа. Сечение изолиний задаётся исходя из погрешности съёмки зависящей от высоты сканирования (рис. 4).

Рис. 4. Фрагменты разновременных статических моделей рельефа (2011 и 2012 гг.) выстроенных во временной ряд с полученным результатом, итоговой динамической моделью (Северный Кавказ, Туапсинский район). На динамической модели горизонтали синего цвета показывают отрицательную динамику, красные положительную – сечение горизонталей 0.1 м. Из доклада: «Мониторинг опасных геологических процессов на линейных объектах». I ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И МОНИТОРИНГ РАЗВИТИЯ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ» (Баборыкин М.Ю.).г. Москва 2013

С развитием технологии лазерного сканирования позволило не только получать массивы точек лазерных отражений высокой плотности, но и с меньшей среднеквадратической ошибкой определять пространственное положение точек. При практических опытах было установлено, что при сочетании передового оборудования в плане и по высоте достигнута погрешность 2 см с высоты летательного аппарата 100-200 м от поверхности земли. Однако столь малая высота для пилотируемого аппарата является опасной для пилотирования. Применение беспилотных летательных аппаратов позволяет работать на малых высотах и в интервале высоты до 10 м от поверхности земли является хоть и очень сложной, но достижимой. Применение воздушного лазерного сканера для мониторинга трубопроводов подземного проложения основано на фиксировании изменения положения специальных устройств (Устройство определения планово-высотного положения трубопровода, патент № 173296) (рис.5). Совмещение данных внутритрубной диагностики с данными воздушного лазерного сканирования показывает более четкую картину положения трубопровода, его техническое состояние и активность (появление/активизация/затухание) опасных геологических процессов.

Рис.5 использование устройства определения планово-высотного положения трубопровода

На сегодняшний день проводятся работы по применению георадаров с беспилотных летательных средств наверх малых высотах, порядка 3, 5, 7, 10 м от поверхности земли [20]. Добавление данных георадара к данным воздушного лазерного сканирования [19, 6] увеличит количество полезной информации. А совокупность данных воздушного лазерного сканирования, внутритрубной диагностики и георадара воздушного базирования позволит получать данные с больших территорий за меньшее время.

Примеры результатов мониторинга физико-геологических процессов и явлений, проведенных в рамках пилотного проекта на объекте – «Расширение ЕСГ для обеспечения подачи газа в газопровод «Южный поток (Турецкий поток)» [3], а также в рамках изучения динамики рельефа для выбора конкурентоспособных направлений трассы трубопровода «Продуктопровод Туапсинский район» [2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Успешным достижением проведения мониторинга является эффективное управление природно-технической системой с целью снижения рисков и обеспечения безопасности эксплуатации сооружений. Эффективное управление, в том числе, напрямую зависит от качества учёта инженерно-геологических условий обуславливающих все многообразие опасных геологических процессов и явлений. Для достижения этой цели необходимо применение рационального технико-методического комплекса наблюдений, в системе мониторинга с учётом сложности строения и свойств объектов исследования. Применение технологии воздушного лазерного сканирования в комплексе технико-методических средств отвечает требованиям рациональной пространственно-временной организации процесса мониторинга и позволит существенно повысить качество геотехнического мониторинга на линейных объектах.

Преимуществом служит возможность ретроспективы к нулевой статической модели, являющейся начальной точкой отсчёта проведения мониторинга. Хранящиеся в банке данных объёмные статические модели рельефа с увязанными геологическими данными образуют кубы данных, позволяющие довольно быстро отстраивать динамические модели и проводить анализы с последующими заключениями и рекомендациями. Дальнейшие исследования применения показателя интенсивности для определения замоченных грунтов и выработки алгоритмов, однозначных показателе, как при определении кромки уреза воды под растительностью, позволит дополнить количество полезной информации для проведения дешифрирования, мониторинга и изучения опасных геологических процессов.

Опытное применение разработанной методики на объекте «Южный поток» (Турецкий поток), наряду с классическими инструментальными методами, не только дополнило ни и выявило, дополнительно, зоны активизации процессов, где отсутствовали элементы сети мониторинга [2, 3]

1. Абатурова И. В., Савинцев И. А., Писецкий В. Б., Петрова И. Г. 2013. Оценка и прогноз инженерно-геологических условий на разных стадиях разведки месторождений полезных ископаемых // Литосфера, 2013, № 3, С. 137–145.
2. Баборыкин М.Ю. 2013. Мониторинг опасных геологических процессов на линейных объектах // Инженерные изыскания. 2013. №10-11. С. 44-55.
3. Баборыкин М.Ю., Е.В. Жидиляева. 2014. Мониторинг оползней с использованием лазерного сканирования и геодезических наблюдений // Инженерные изыскания. 2014. №3. С. 16-24.
4. Баборыкин М.Ю., Жидиляева Е.В., Погосян А.Г. 2015. Выявление опасных геологических процессов при проведении инженерно-геологических изысканий на основе цифровых моделей рельефа // Инженерные изыскания. 2015. № 2. С. 30-37.
5. Баборыкин М.Ю., Ерух В.П., Жидиляева Е.В. Методико-технические аспекты при проведении дешифрирования опасных геологических процессов по данным воздушного лазерного сканирования // Инженерная геология Северо-Западного Кавказа и Предкавказья: современное состояние и основные задачи. Сб. науч. Трудов. Краснодар: Просвещение-Юг, 2015 г. С.: 185-190.

6. Баборыкин М.Ю., Кулижников А.М., Еремин Р.А. Комплексное обследование оползней // Журнал Автомобильные дороги. Февраль 2018 №2 (1035). С. 106-113.
7. Баклагин В. Н. 2013. Построение математической модели котловины Онежского озера. [Электронный ресурс] Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2015. Сделано в СКНЦ ВШ ЮФУ. Номер 3, 2013 г. Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/postroenie-matematicheskoy-modeli-kotloviny-onezhskogo-ozera> (доступ свободный). Загл. с экрана – Яз.рус.
8. Звонкова Т.В. 2001. Прикладная геоморфология. Москва: издательство «Высшая школа» 1970 г. С. 127-140.
9. Иванов И.П., Тржцинский Ю.Б. 2001. Инженерная геодинамика. Санкт-Петербург «Наука» 2001 г. С. 136-407.
10. Королёв В.А. 2007. Мониторинг геологических, литотехнических и экологических систем: Учебное пособие. М.: КДУ, 2007. С. 245-248.
11. Маций С.И., Безуглова Е.В. 2010г. управление оползневый риском. Монография Краснодар, 2010г. СС. 177-184, 202-210.
12. Медведев Е.М. Лазерная локация земли и леса / Е.М. Медведев, И.М. Данилин, С.Р. Мельников. Учебное пособие. М.: Геолидар, Геокосмос; Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН 2007 г. С.: 94-100.
13. Под редакцией Р. Шустера и Р. Кризека, перевод с англ. А.А. Варги и Р.Р. Тизделя под ред. Г.С. Золотарёва. 1981. Оползни исследование и укрепление. Москва «Мир» 1981 г. С. 69-70.
14. Познанин В.Л., Пространственная дифференциация геологической среды – основа единой системы экзогенных геологических процессов // Планета Земля. 2012. № 3(9). С. 184-192.
15. Рис У.Г. 2006. Основы дистанционного зондирования. Москва: Техносфера, 2006 г. С. 202-205.
16. Симонов Ю.Г., Кружалин В.И. 1993. Инженерная геоморфология. Москва: МГУ, 1993 г. С. 139-146.
17. Соловьёв В.А., Соловьёва Л.П. 2005. Глобальная экология (экология геосфер земли). Краснодар: Изд-во КубГУ, 2005. СС. 26, 310-314.
18. Мультиспектральная лазерная сканирующая система. [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.jena.ru/catalog/18/468.html>.
19. S. Lambot, Lutz Weihermüller, Johan Alexander Huisman, Evert C. Slob. Analysis of air-launched ground-penetrating radar techniques to measure the soil surface water content // Water Resources Research 42 · November 2006 [Электронный ресурс] Режим доступа https://www.researchgate.net/publication/46059620_Analysis_of_air-launched_ground-penetrating_radar_techniques_to_measure_the_soil_surface_water_content.
20. SPH Engineering GPR drone integrated system. [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://geomatching.com/uas-for-mapping-and-3d-modelling/gpr-drone-integrated-system>.
21. Charles K. Toth, Omar Ernesto Mora, M. Gabriela Lenzano, D.A. Grejner-Brzezinska. Landslide Hazard Detection From LiDAR Data // March 2013 with 226 Reads. [Электронный ресурс]. Режим доступа https://www.researchgate.net/publication/287398017_Landslide_Hazard_Detection_From_LiDAR_Data.
22. Meei-Ling Lin, Te-Wei Chen, Ching-Wee Lin, Dia-Jie Ho, Keng-Ping Cheng, Hsiao-Yuan Yin and Mei-Chen Chen. Detecting Large-Scale Landslides Using Lidar Data and Aerial Photos in the Namasha-Liuoguey Area, Taiwan // Remote Sens. 2014, 6; doi:10.3390/rs6010042. P. 42-63.
23. Weitao Chen, Xianju Li, Yanxin Wang, GangChen, Shengwei Liu. Forested landslide detection using LiDAR data and the random forest algorithm: A case study of the Three Gorges, China // Remote Sensing of Environment. Volume 152, September 2014, P. 291-301.
24. Rubini Mahalingam, Michael J. Olsen & Matt S. O'Banion. Evaluation of landslide susceptibility mapping techniques using lidar-derived conditioning factors (Oregon case study) [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19475705.2016.1172520>.
25. Karen Elizabeth Joyce, S. V. Samsonov, Shaun R Levick, Jeanine Engelbrecht Mapping and monitoring geological hazards using optical, LiDAR, and synthetic aperture RADAR image data // Natural Hazards 73(2):1-27 · September 2014 with 1,067 Reads. [Электронный ресурс]. Режим доступа https://www.researchgate.net/publication/261070509_Mapping_and_monitoring_geological_hazards_using_optical_LiDAR_and_synthetic_aperture_RADAR_image_data.
26. Tomás Fernández, José Luis Pérez, Carlos Colomo, Javier Cardenal, Jorge Delgado, José Antonio Palenzuela, Clemente Irigaray and José Chacón. Assessment of the Evolution of a Landslide Using Digital Photogrammetry and LiDAR Techniques in the Alpujarras Region (Granada, Southeastern Spain) // Geosciences 2017, 7(2), 32 [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://www.mdpi.com/2076-3263/7/2/32>.