

КАРТА ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ БОЛГАРИИ

Введение. Планета Земля представляет сложную систему и сама является частью других, более больших образований, поэтому постоянно испытывает внутренние и внешние воздействия, отражающиеся на структуре и форме. Для ответа на свои вопросы геодинамика базируется на ряде наук, часть которых представляет интерес для геодезии. Исторический взгляд на развивавшиеся много веков назад землетрясения делает некоторые регионы особенно интересными для наблюдения. Наличие обширных высокоточных нивелирных сетей, продолжительных по времени оценка сейсмических событий на территории республики Болгарии в последние десятилетия послужили основой для анализа вертикальных движений регионального масштаба.

Государственная нивелирная сеть высшего класса. Государственная нивелирная сеть Болгарии содержит четыре класса измерений. Наибольшие требования к точности предъявляются к сети первого класса, созданной для решения ряда инженерно-технических задач и научных вопросов. Проводятся следующие этапы ее развития.

1-й этап (1920–1943). Построена от бывшего Географического института к Министерству обороны. После 1929 г. была внедрена Черноморская высотная система; начато наблюдение среднего уровня моря, установленный при Варненском мареографе. Наблюдения устойчивости реперов в 1936 гг. были установлены одна главная и четыре контрольные точки в городах Варна, Бургас, Казанлак и Левски. Достигнутая точность составила 0,75 мм/км, общая длина нивелирной линии – 4200 км.

2-й этап (1952–1965). Измерения реперов выполнялись Географическим институтом и Геопланпроектом. Измерения этого этапа связаны с введением после 1952 г. новой для Болгарии Балтийской высотной системы с новым началом на Кронштадтском мареографе. Достигнутая точность составила 0,40 мм/км, а общая длина нивелирных линий – около 5000 км.

3-й этап (1974–1982). Измерения осуществляли Геопланпроект и НИГиФ. Высотная система Балтийская. Выполненные измерения позволили после 2003 г. связать Государственную нивелирную сеть с Объединенной европейской сетью (UELN). С обособлением геодинамики как науки в начале 60-х годов XX в. перед нивелированием была поставлена задача определения вертикальной компоненты современных движений земной коры. Достигнутая точность – 0,40 мм/км, длина нивелирных линий была равна 5630 км.

4-й этап (1995 – до настоящего времени). Сделаны измерения менее, чем по половине сети (46 %, данные с 2008 г.). Это объясняется тем, что получаемые результаты не могут быть использованы для целостной оценки, однако в дальнейшем они могут быть использованы для исследований.

Уравнивание отметок реперов и получение скоростей вертикальных движений. В связи со стремлением улучшить связь болгарской сети с соседними государствами, унифицировать размер полигонов, расположить реперы в более стабильных районах, а нивелирные линии проложить в более пологих местностях, конфигурация сети стала меняться. Общими для трех этапов оказались только 17 реперов. Вместе с тем даже одно уравнивание для соответствующих этапов и сопоставление скоростей в отдельных точках, имело бы существенное значение для установления скоростей вертикальных перемещений и их изменений во времени. Для этой цели было сделано параметрическое уравнивание по методу наименьших квадратов (МНК), при котором предложена так называемая «статическая уравнивающая модель». Основная идея этой модели состоит в том, что измерения различных эпох уравниваются отдельно. Приведем общий вид уравнений измерения и поправок:

уравнения измерения

$$H_i = H_i^0 + dH_i;$$

уравнения поправок

$$v_{ij} = dH_j - dH_i + f_{ij},$$

где $f_{ij} = H_j^0 - H_i^0 - h_{ij}$ – свободный член в уравнении поправок.

Сеть уравнена как самостоятельная, включающая в себя 17 реперов, 16 из которых имеют новые отметки. За начальный принят город Варна. Он расположен в районе сравнительно спокойном с точки зрения сейсмической активности. Дополнительное преимущество – близость станции мареографных наблюдений.

После уравнивания вычислены скорости вертикального перемещения каждого из реперов по формуле

$$V_i = \frac{H_i^{(j)} - H_i^{(k)}}{t_i^{(j)} - t_i^{(k)}} = \frac{H_i^{(j)} - H_i^{(k)}}{\Delta t^{(k,j)}}, \text{ мм/г.}$$

Вычисление средних квадратических ошибок скоростей сделано в соответствии с выражением:

$$m_{V_i} = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial H_i^{(j)}}\right)^2 m_{H_i^{(j)}}^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial H_i^{(k)}}\right)^2 m_{H_i^{(k)}}^2} = \\ = \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta t^{(k,j)}}\right)^2 m_{H_i^{(j)}}^2 + \left(\frac{1}{\Delta t^{(k,j)}}\right)^2 m_{H_i^{(k)}}^2}, \text{ мм/г.}$$

Выбраны средние периоды для вычисления: 27 лет – для 1 и 2-го этапа, 19,5 лет – для 2 и 3-го и 46,5 лет для 1–3 этапов. Параметрами j и k обозначены соответствующие этапы измерения, $j > k$. На рис. 1 отражены полученные результаты, которые позволяют сделать следующие выводы:

1) скорости реперов вычислены на основе разницы в отметках между первым и вто-

рым этапами, имеющими положительные значения (что означает поднятие этих точек) исключение составляют города Кюстендил, Софии, Пазарджик и Омуртаг;

2) скорости реперов от второго до третьего этапа отрицательные (т. е. фиксируемое оседание); исключение – города Пазарджик, Омуртаг и Бургас;

3) скорости реперов 1–3-го этапов отрицательны, исключение – Омуртаг и Бургас.

На практике однако оказалось, что для некоторых реперов (например, Русе, Враца, Кюстендил) средние квадратические ошибки превышают по абсолютным значениям соответствующие скорости или меньше. Но одновременно это больше, чем требуется для достоверного результата – $V > 3m_V$ (Монтана, Габрово и др.). Высокие значения ошибок объясняются малым числом измерений. Значительное влияние оказывают конфигурации сети, и отдаленность исходного репера.

Число идентичных реперов между первым и третьим этапом нивелирных измерений – 31. Сделано новое уравнивание. Значительно большее количество исходных данных, как и сравнительно длинный интервал между двумя этапами измерений, позволяет предположить, что полученные скорости будут иметь средние квадратические ошибки, которые позволяют предположить надежность полученных данных. На рис. 2 визуализированы скорости в двух случаях – после уравнивания с 17 и 31 реперов.



Рис. 1. Скорости вертикальных движений для 1–2, 2–3, 1–3 этапов в результате уравнивания 17 реперов

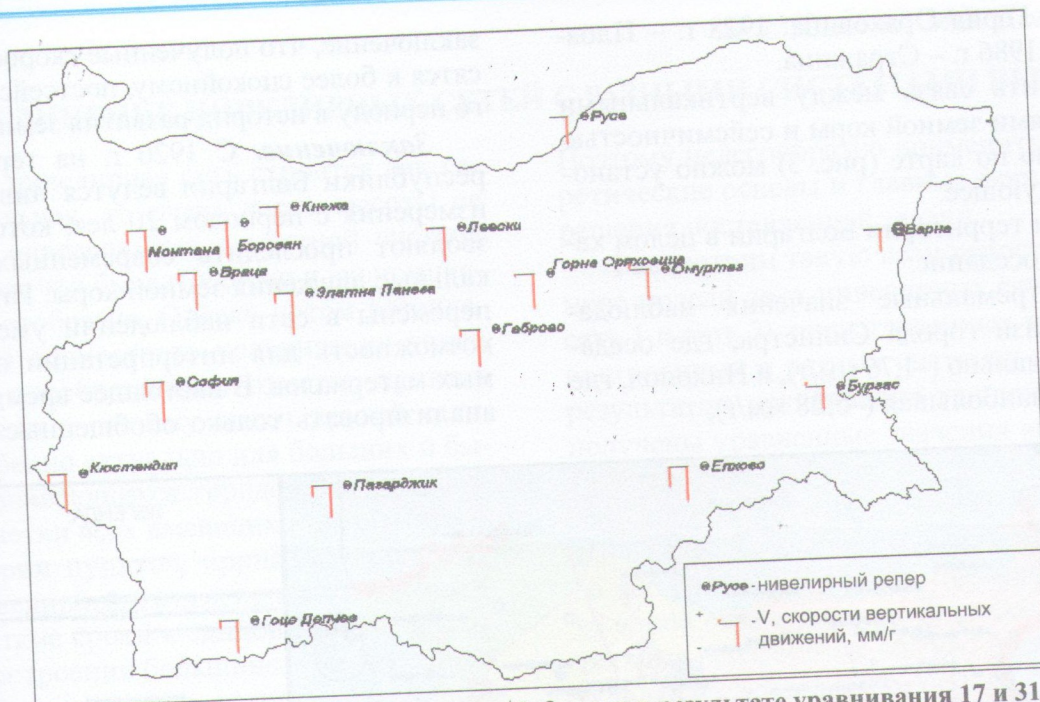


Рис. 2. Скорости вертикальных движений для 1–3 этапа в результате уравнивания 17 и 31 репера

Составление карты вертикальных движений на фоне сейсмичности Болгарии и связь между ними. В сделанных сопоставлениях вычисленных скоростей между отдельными этапами при различных исходных величинах, надежными оказались только значения, полученные в последнем случае – между первым и третьим этапами с 31 идентичным репером. Карта современных вертикальных движений основывается именно на них. В качестве дополнения к геодинамической картине отражены и сейсмические события на территории Республики и в непосредственной близости от нее в последние столетия. Для графической основы использована векторизованная карта масштаба 1 : 200 000 в конической проекции. По значениям скорости с помощью AutoCAD Civil была создана TIN-модель (сеть из неправильных треугольников). Значения экстраполированы по методу Кригинга до границ государства. Указаны конкретные значения каждой из точек; полученная поверхность имеет фоновое окрашивание. Каждый цвет имеет сечение 0,5 мм/г. Землетрясения (с магнитудой более 5 баллов по шкале Медведева-Шпонхойера-Карника) локализованы в масштабные знаки и сгруппированы в два периода – 1900–1977 и 1977–2005 гг. Маркированы также установленные границы сейсмических районов (обозначены прямыми линиями для простоты).

Для объективного поиска взаимосвязи между геодезическими наблюдениями и землетрясениями, рассмотрена геодинамическая обстановка в государстве. Сейсмичность в Европе неравномерна и сконцентрирована в южных частях континента, и частично на Балканском полуострове – наиболее активном узле материка. Сейсмичность на территории Болгарии доказана. Она приурочена к активному Алпхимальскому поясу, в непосредственной близости от Егейского региона с его землетрясениями, имеющим неглубокое, коровое происхождение. Очаги землетрясений находятся на глубине 10–30 км; исключения представляют юго-западные районы, где глубина их расположения около 50 км. Этот район – с наиболее высокой сейсмической активностью; следующими являются Пловдивский район, Горнооряховская и Калиакренская области. Территория Болгарии находится между стабильной частью Мизийской плиты на севере и Вардарский и Измиро-Анкарским швом на юге. Некоторые из наиболее сильных землетрясений в Европе в XX в. произошли именно в Болгарии и только в период 1901–1928 гг. (до начала первого нивелирного этапа), пять из них были с магнитудой 7 и более. На карте отмечены несколько лет, с которыми связаны наиболее значимые землетрясения: 1901 г. – Шабла; 1904 – Крупник-Кресна с магнитудой 7,8 по шкале Рихтера (это самое сильное землетрясение во всей Европе за прошедшие 100 лет);

1913 г. – Горня Оряховица; 1928 г. – Пловдивское; 1986 г. – Стражица.

Оценить связь между вертикальными движениями земной коры и сейсмичностью трудно, но по карте (рис. 3) можно установить следующее:

- 1) для территории Болгарии в целом характерно оседание;
- 2) экстремальные значения наблюдаются вблизи города Силистра, где оседание минимально ($-1,76$ мм/г), и Никопол, где скорость наибольшая ($-5,28$ мм/г);

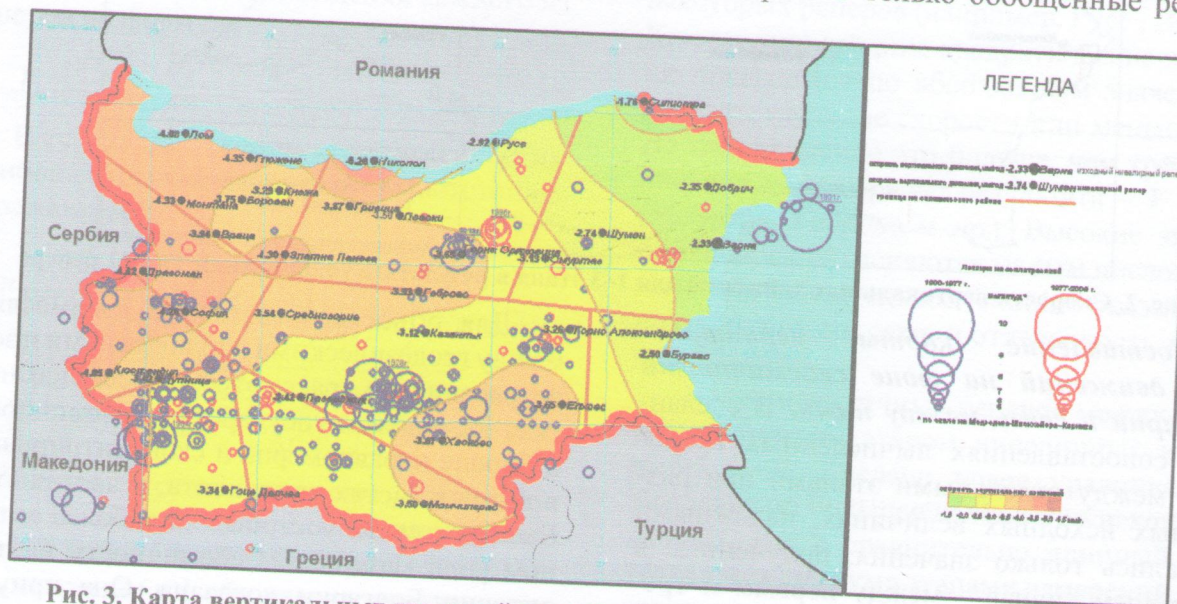


Рис. 3. Карта вертикальных движений земной коры на территории республики Болгарии

3) в северной части страны, занятой Дунайской равниной, наблюдается значительное разнообразие скоростей – именно там отмечаются эти два экстремума; с другой стороны, это исключительно спокойный в отношении сейсмичности район, что объясняется его приуроченностью к Мизийской плите;

4) в северо-восточной, приморской частях, скорости низкие по значениям, движения плавные, однако одно из наиболее сильных в государстве землетрясений случилось именно здесь;

5) в юго-западной и центральной частях (преимущественно горные области с характерной разломной структурой) сейсмическая активность значительна, однако вертикальные движения плавные и близкие по значениям;

6) большая часть землетрясений приурочена к области со скоростями $-3,00 \div -3,50$ мм/г. и $-3,50 \div -4,00$ мм/г.;

7) наиболее значимые землетрясения были перед началом исследований с помощью нивелирования, поэтому можно сделать

заключение, что полученные скорости относятся к более спокойному, постсейсмическому периоду в истории развития земной коры.

Заключение. С 1920 г. на территории республики Болгарии ведутся нивелирные измерения с периодом 20 лет, которые позволяют проследить современных вертикальные движения земной коры. Различные перемены в сети наблюдений уменьшают возможность для интерпретации получаемых материалов. В настоящее время можно анализировать только обобщенные резуль-

таты одного скоростного модуля за 50-летний период. Его результаты являются доказательством земной активности в локальном масштабе, также свидетельствуют о возможности последующего анализа прошедших сейсмических событий. Продолжение ряда измерений даст дополнительную информацию для изменений скорости и позволит установить более ясную пространственную зависимость между вертикальными движениями и силой предстоящих землетрясений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляшки Т. Държавна нивелачна мрежа I клас България // Геодезия, картография, земеустройство. 2008. № 5–6.
2. Инструкция за нивелация I и II клас. София: ГУГК. 1980.
3. Ценов Л., Ботев Ем. Земетръсна опасност и управление на сеизмичния риск. Последствия от земетресенията в края на XX век у нас: Втора национална научно-практическа конференция по управление в извънредни ситуации и защита на населението, София – БАН, 9 ноември, 2007.
4. Milev G., Vassileva K. Geodynamics of The Balkan Peninsula and Bulgaria: International Symposium on Strong Vrancea and Risk Mitigation, Oct. 4-6, 2007, Bucharest, Romania.