

ИЗУЧЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ДАННЫМ ПОДЗЕМНЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

Задачи исследования

Геодинамические процессы традиционно исследуются методами геологии. Современная геодинамика – наука о движениях земной коры, периоды которых малы в масштабе геологических эпох, требует применения точных инструментальных методов. Поэтому при исследованиях современных движений земной коры широко используются геодезические методы и методы локальных деформационных измерений, проводимых в подземных станциях. Измерения проводятся на относительно коротких базах деформационными приборами с высокой разрешающей способностью. Деформационные приборы, которыми оборудованы эти станции – деформографы, наклонометры и другие измеряют относительные смещения на базах длиной порядка десятков и первых сотен метров с точностью 10^{-7} для долговременных процессов и с разрешающей способностью порядка 10^{-10} – 10^{-12} – для суточных. Этот метод востребован при изучении детального распределения деформаций в пространстве и их изменений во времени, выявлении неоднородностей и разрывных нарушений, где скорости деформаций велики, при поисках деформационных предвестников землетрясений. Он применяется при изучении земных приливов, при количественной оценке резонансных эффектов жидкого ядра Земли и ее собственных колебаний, а также других тонких деформационных эффектов. Создание сетей подземных деформационных станций относится ко второй половине прошлого века и связано с интенсивным развитием работ по прогнозу землетрясений. Перспективность использования деформационных станций зависит от того, отражают ли их данные тектонические процессы в земной коре и не маскируются ли они воздействием локальных процессов на локальных площадках. Использование локальных методов совместно с региональными присуще многим областям науки, в том числе и геологии. При необходимости повысить надежность и детальность данных изучают геологические структуры изнутри: в шурфах, скважинах, штольнях; проводят палеосейсмогеологические исследования в приповерхностных слоях Земли, вскрывают в траншеях ископаемые сейсморазрывы, погребенные почвы и другие следы катастроф [1].

В данной работе рассматривается соответствие результатов локальных и региональных измерений деформаций земной коры.

Особенности деформационных методов

Наблюдаемый сейчас прогресс в изучении современных движений земной коры достигнут благодаря успехам в развитии космической геодезии и широкому внедрению GPS измерений. Методами GPS определены скорости движения глобальных структур и деформаций земной коры в сейсмически активных регионах. В какой мере системы GPS могут заменить сети подземных деформационных станций? На этот вопрос частично отвечают приводимые ниже оценки. База измерения GPS варьируется в пределах от сотен метров до нескольких сотен километров, в зависимости от решаемых задач. Смещения пунктов могут определяться с точностью до 1 мм. Чувствительность к изменениям деформации порядка 10^{-8} и определяется уровнем помех. Проблемой остается обнаружение сигналов от локального источника, точное положение которого неизвестно. В первую очередь речь идет о предвестниках землетрясений [2]. Плотность системы пунктов GPS в сейсмогенных зонах должна быть велика, так как предвестники землетрясения в виде смещения земной поверхности или ее деформации быстро уменьшаются с расстоянием от будущего очага (рис. 1). Если смещения в очаге равны 10 см, то на расстоянии, десятикратном от его радиуса, они равны 1 мм. Протяженность очагов сильных землетрясений в районе Восточных Карпат с магнитудой 4–4,5 равна 2–4 километра и, следовательно, станция GPS способна контролировать ситуацию на расстоянии до 10–20 км. В этой зоне деформация достигает величины 10^{-6} . При тех же условиях есть больше шансов обнаружить предвестники в виде деформации земной поверхности. Итак, при поисках предвестников умеренных землетрясений измерения деформаций в подземных камерах имеют преимущества перед GPS измерениями благодаря более высокой чувствительности. Поэтому данный метод остается востребованным для изучения этих и других упомянутых выше малоамплитудных деформационных процессов [3–5]. В большом проекте по прогнозу земле-

трясений на разломах Сан-Андреас в США густая сеть GPS станций дополняется прецизионными локальными приборами. В последние

годы появились способы по данным больших профилей GPS рассчитать скорость деформации вблизи ее источника [6].

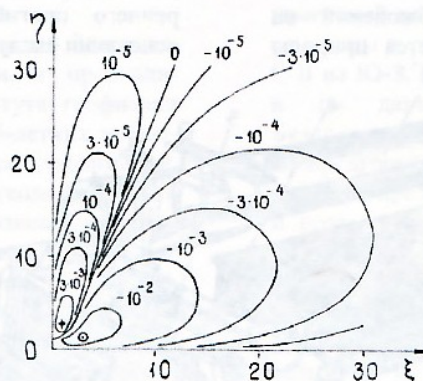


Рис. 1. Распределение деформаций в окрестности возмущенной зоны.

По осям отложены расстояния от центра возмущенной зоны r в единицах ее радиуса R_0 : $\xi=r/R_0$, $\eta=r/R_0$. Если деформация в этой зоне равна 10^{-4} , то на расстоянии 20 радиусов от нее она равна 3×10^{-8} , предельной величине предвестника, который может быть обнаружен)

Деформационные измерения в Закарпатье

В 80–90 годах прошлого века в украинской части Восточных Карпат была создана сеть подземных деформационных станций [7–9]. Первые наблюдения над изменениями напряженно-деформированного состояния горных пород были организованы в районе г. Берегово в разведочных штольнях рудника Мужиево сейсмоакустическим методом. По изменениям скоростей сейсмоакустических волн в зондируемой зоне массива определялся характер деформационного процесса. В соседней штольне в 1986 г. О.И. Юркевич совместно с сотрудниками ИФЗ РАН установила кварцевые деформографы. В 1990 г. Т.З. Вербицкий была создана вторая станция в г. Берегово. В бывших подземных винных погребах были созданы термостатированные камеры и установлены деформографы и наклонометры. В 2000 г. открыта станция Королево на востоке Закарпатского внутреннего прогиба вблизи г. Виноградово [4, 10]. Деформографы, которые в 90-е годы работали на этих станциях, были разработаны и изготовлены в ОКБ ИФЗ РАН. Использовались оптические и фотооптические преобразователи. На рис. 2 приведена схема кварцевого деформографа и современного электронного емкостного преобразователя. Приборы такого типа хорошо себя зарекомендовали и работают на многих станциях во всем мире [11]. Кварцевая труба 7 (рис. 2) длиной 15–25 м служит эталоном длины. Она поддерживается в горизонтальном положении системой подвесов. Один ее конец закреплен в горной породе, второй соединен с измеряющим устройством. Емкостной преобразователь деформографа состоит из основания 1, на котором на упругих направляющих 3 установлен корпус измерительного конденсатора 2. В корпусе закре-

плены параллельно две пластины 4, являющиеся статорными обкладками конденсатора. В зазоре между ними находится подвижная пластина 5, которая скреплена с концом штанги. Пластины образуют дифференциальный емкостной преобразователь. Для калибровки используется специальное устройство, позволяющее смещать корпус конденсатора в пределах 500 мкм на величины 0,1 мкм. Качество преобразователя в значительной мере определяется точностью выполнения его механических узлов. Технические характеристики прибора даны в табл. 1.

Таблица 1

Технические параметры деформографа с базой 16 м

Чувствительность к смещениям / деформациям	1 нм / $0,5 \times 10^{-10}$
Диапазон амплитуд смещений	± 25 мкм
Диапазон частот	0–0,005 Гц
Коэффициент преобразования	0,4 В на 1 мкм
Диапазон выходного сигнала	± 10 В
Чувствительность цифровой записи при 16 бит АЦП	0,5 нм
Долговременная стабильность	5×10^{-7} в год

Результаты наблюдений

В работе приведены результаты анализа наблюдений на станциях Закарпаття за период с

1991 по 2003 год, полученные совместно с Т.З. Вербицким и сотрудниками сейсмических станций Закарпатья [3, 7–9]. Основной вывод, сделанный по результатам наблюдений на деформационных станциях, касается природы

регистрируемых медленных движений земной коры. Деформационные станции в Закарпатье регистрируют движения Закарпатского внутреннего прогиба. Такой вывод сделан на основании следующих данных.

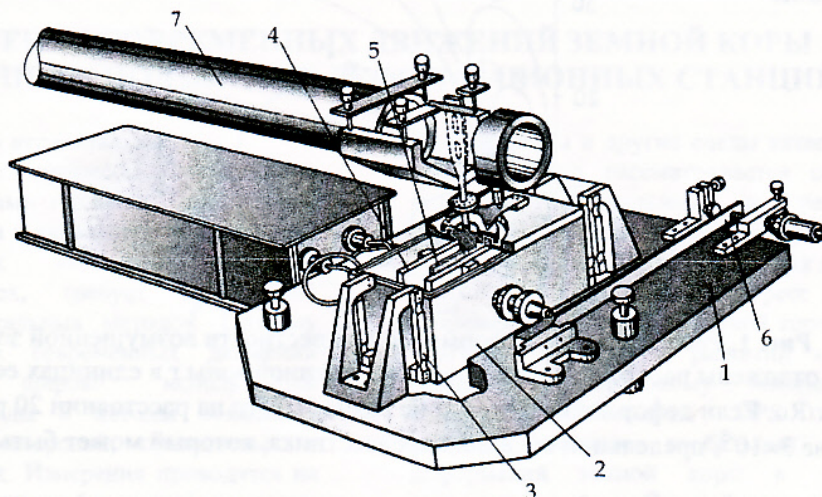


Рис. 2. Конструкция емкостного преобразователя деформографа (обозначения даны в тексте)

Показано, что деформационные процессы на двух локальных площадках в районе Берегово – не эффекты локальных воздействий, а локальные проявления региональных процессов. Станции располагаются в пределах одной тектонической структуры – Береговского холмогорья, на расстоянии 8 км друг от друга. На станциях работают четыре деформографа в четырех разных направлениях. Предполагая, что поле деформаций в этом районе однородно, тензор деформации можно определить по трем компонентам деформации на земной поверхности. Здесь и ниже речь идет не об абсолютной величине деформаций, а об их годовых скоростях. Четвертая компонента деформации служит для контроля правильности предположения об однородном поле деформаций. Для краткости годовые скорости деформации здесь названы деформациями и обозначены как ϵ , а не как $\delta\epsilon/\delta t$ [10]. В таблице 2 даны деформации в пунктах Мужиево (М) и Берегово (Б) в азимутах α .

По формулам преобразования компонент деформации при переходе из одной системы координат в другую определяем скорости линейных деформаций по меридиональному Y и широтному X направлениям ϵ_{yy} и ϵ_{xx} , а также сдвиговую компоненту ϵ_{xy} .

$$\epsilon_{xx} = -33,5 \times 10^{-7} \text{ ед./год,}$$

$$\epsilon_{yy} = +12,8 \times 10^{-7} \text{ ед./год,}$$

$$\epsilon_{xy} = -2,3 \times 10^{-7} \text{ ед./год}$$

Четвертая компонента деформации мала, определяется с малой точностью и ею определяется точность оценки главных удлинений.

Таблица 2
Годовые деформации в разных направлениях

Пункт	α	ϵ ($\times 10^{-7}$ в год)
М	37°	-5
М	73°	-30
Б	140°	-5
Б	50°	± 5

Предположение об однородности поля деформаций в районе Берегово в общих чертах справедливо. Главные оси поля деформаций имеют примерно широтное и меридиональное простираие, т.к. сдвиговая компонента деформации в этой системе координат мала. По широтному направлению происходит интенсивное сжатие пород со скоростью $-33,5 \times 10^{-7}$ в год, по меридиональному – умеренное расширение со скоростью $+12,8 \times 10^{-7}$ в год. Этот результат, как будет показано ниже, хорошо согласуется с данными геодезических измерений и геологическими представлениями.

На следующем этапе исследований выполнено сравнение полей деформаций, построенных по данным деформационных станций и по данным геодезических измерений на территории Паннонской впадины и Карпат. Эти измерения выполнены Императорским Военно-географическим Институтом за 75-летний период с середины XIX века по 20-е годы прошлого столетия и на полигонах Украины в последующие годы. Результаты станционных наблюдений сравниваются с результатами

угловых измерений на территории Паннонского бассейна, светодальномерных измерений на полигонах Украины и GPS измерений на Украине и в Центральной Европе.

Данные наблюдений в области Закарпатского внутреннего прогиба были проанализированы сотрудниками Института геофизики НАНУ [12] и по результатам 75-летних наблюдений определены главные оси деформаций. Структура поля деформаций по геодезическим и деформационным данным одинакова, но средние годовые скорости деформаций различны. По данным деформационных станций, полученным за 5-летний период, они примерно в 20 раз больше, чем по геодезическим данным за 75 лет [8]. Известно, что средняя скорость деформации среды зависит от длительности эпохи наблюдений и длины измеряемых линий. Она тем меньше, чем больше интервал осреднения во времени и в пространстве [13]. Несколько лет назад оценки, полученные по измерениям Австро-Венгерской сети, были выборочно проверены венгерским геодезистом Д. Садсэки-Кардос [10]. В Паннонском бассейне ошибки определения оказались сравнимыми

с измеряемыми величинами и поэтому сопоставлять данные деформографов на станциях, показанных на рис.3, с данными угловых измерений не имеет смысла. Большие смещения отмечены в районе Будапешта в направлении с С-В на Ю-З. Именно в этом направлении также и по данным деформационной станции Будапешт годовая скорость деформации велика. В предгорьях Карпат смещения превышают ошибки определения углов в сети триангуляции, и поэтому оценки В.И. Сомова в работе [12] правомерны. На рис. 3 дана тектоническая схема Карпато-Балканского региона и показано расположение деформационных станций.

Направления и величина стрелок дают величину и знак деформации на каждой из станций. На станциях Берегово, обозначенной цифрой (3), по всем измеряемым направлениям регистрируется сжатие пород, максимальное в широтном направлении. Характер деформаций, регистрируемых на семи деформационных станциях Карпато-Балканского региона, согласуется с характером тектонического развития геологических структур.

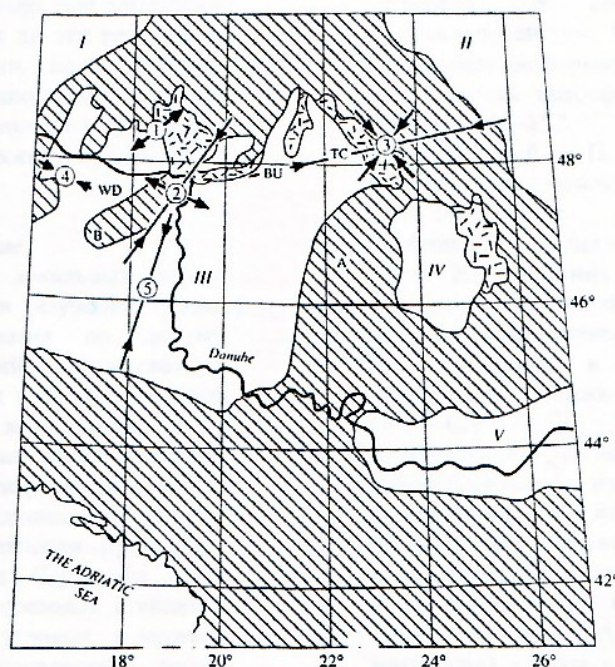


Рис. 3. Схема тектонического строения Карпато-Балканского региона и скорости деформаций по данным деформографов (здесь: I – Чешский массив; II – Восточно-Европейская платформа; III – Паннонская депрессия; TC – Закарпатский внутренний прогиб; 1, 2, 3... – деформационные станции: 1 – «Вигне» (Словакия); 2 – «Будапешт», 4 – «Шопрон», 5 – «Печ» (Венгрия); 3 – «Мужиево»-«Берегово», 6 – «Королево» (Украина). Стрелками показаны скорости деформации пород: к станции – сжатие пород, от станции – растяжение пород

По данным станций Мужиево и Берегово определены направления главных осей деформации: удлинение в близмеридиональном и сжатие – в близширотном. Структура полей

деформации в западной части Закарпатского внутреннего прогиба по деформационным данным согласуется с картами новейшей тектоники [14, 15] Согласно наиболее рас-

пространственным моделям тектонического развития Балкано-Карпатского региона его структура определена мантийным астенолитом, всплывающим в центре Паннонской впадины. Под его действием центральная часть впадины растягивается, окраины и предгорья Карпат сжимаются. С этой схемой согласуются и деформационные наблюдения. На станциях Закарпатья, на венгерских станциях «Будапешт» (2) и «Шопрон» (4), на чешской станции «Вигне» (1) в направлении простирания структур регистрируется слабое расширение, в направлении, поперечном к складчатым структурам – интенсивное сжатие. Эту схему подтверждают данные GPS измерений. Оценка деформаций на территории Центральной Европы по данным GPS выполнена в работе К. Третьяка и О. Серант [16]. В табл. 3 приведены взятые из этой работы данные по трем сетям GPS в изучаемом районе.

Таблица 3
Объемная Δ и линейные E1 и E2 деформации в Карпато-Балканском регионе

Сеть GPS	Δ $\times 10^{-8}$	E1 (СЮ)	E2 (ВЗ)
Gras/huytb/mopi	-1.75	+0.87	-2.62
Mopi/stho/penc	-6.51	+0.50	-7.02
Csar/disz/penc	-4.31	+1.91	-6.21

Согласно приведенным данным всех трех сетей GPS объемная деформация Δ соответствует сжатию земной поверхности, линейная деформация вдоль меридиана E1 – умеренному удлинению, линейная деформация вдоль параллели E2 – интенсивному сжатию. Деформации, регистрируемые локальными станциями, согласуются с региональными деформациями, рассчитанными по данным сетей GPS станций.

Особый интерес представляют результаты наблюдений на последней из созданных Т.З. Вербицким станций – станции «Королево», находящейся вблизи г. Виноградово, в центральной части Закарпатского внутреннего прогиба. На этой станции, единственной из всех станций Карпатского региона, регистрируется расширение пород в широтном направлении, причем очень большой величины. Данные геологических и геофизических исследований подтверждают объективность полученных результатов [4, 10, 14]. Станция Королево находится вблизи Выгорлат-Гутинской вулканической гряды, которая образовалась в результате интенсивного вулканизма в неогене, в зоне Оашского глубинного разлома, по которому происходило излияние лав в неоген – четвертичное время (рис. 4).

Эта область и в настоящее время является одной из наиболее активных в Закарпатье. Она

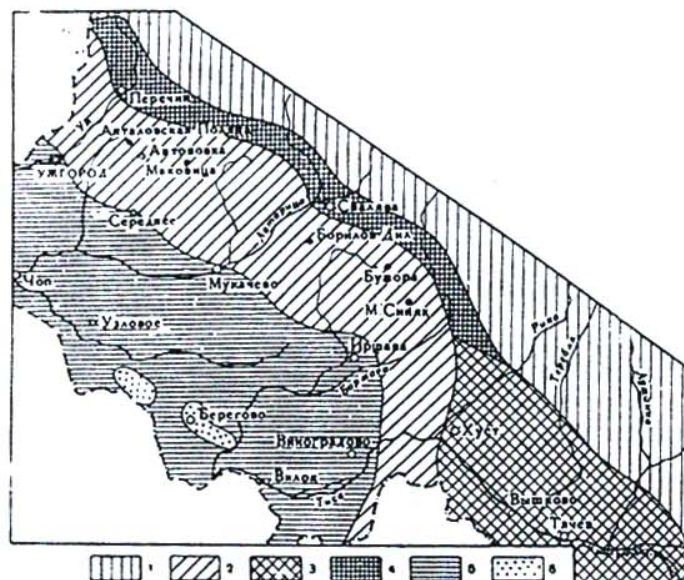


Рис. 4. Геоморфологическая схема Закарпатья: 1 – Отроги Полонинского хребта, 2 – Выгорлат-Гутинская гряда, 3 – Солотвинская котловина, 4 – Завыгорлатская продольная долина, 5 – Чоп-Мукачевская равнина, 6 – Береговское холмогорье и Косыно-Беганьские возвышенности. Станция «Королево» находится в 8-ми км к востоку от г. Виноградово

характеризуется аномально высоким тепловым потоком, большими скоростями смещений по

разломам и расширением пород. Относительное раздвижение крыльев Закарпатского глубинного

разлома происходит со скоростью 9 мм в год. Скорости расширения пород в южной части Выгорлат-Гутинской гряды по светодально-мерным и GPS данным достигают 20×10^{-7} в год. Скорость расширения пород по данным станции Королево достигает 70×10^{-7} в год. О высокой мобильности участка, где располагается станция Королево, свидетельствует также положительная аномалия амплитуды лунного прилива, определенная по деформографическим данным. Лунная волна M2, наиболее точно определяемая и поэтому используемая при тектонических исследованиях, в районе станции на 50% выше нормы. Результаты, полученные на станции Королево, надо рассматривать как серьезные доказательства эффективности использования подземных деформационных станций при изучении региональных тектонических процессов.

Представленные геофизические материалы свидетельствуют в пользу надежности полученных данных о расширении пород в широтном направлении и о его высокой скорости. Вместе с тем надо иметь в виду, что эти результаты получены по данным первых трех лет наблюдений, когда строительство и оборудование станции не было еще закончено. Вопрос в том, подтвердятся ли эти результаты дальнейшими наблюдениями. Если, действительно, обнаружена зона аномально сильных движений, ее можно использовать как индикатор развития тектонических процессов в Закарпатье.

Заклучение

Эффективность метода локальных деформационных измерений при изучении региональных процессов показана по данным наблюдений двух станций «Мужиево» и «Берегово», расположенных в пределах единой структуры – Береговского холмогорья. Структура поля деформаций на обеих станциях подобна. Главные оси деформаций имеют близширотное и близмеридиональное направления. В широтном направлении происходит интенсивное сжатие пород. Структура полей деформаций по данным подземных станций и по данным многолетних угловых измерений одинакова. В широтном направлении происходит интенсивное сжатие земной коры. Скорости деформаций, полученные разными методами, различны по величине. По данным деформационных станций они в 20 раз больше. Причина различия средних скоростей деформации – в разных масштабах осреднения измеренных величин при локальных деформографических и субрегиональных геодезических измерениях. В первом случае база измерения порядка 20 м, на геодезических полигонах она порядка десятков километров.

Время осреднения также различно. Период деформационных измерений, представленных в работе, около 5 лет. Эпоха геодезических измерений около 100 лет. Различия в величинах средней скорости деформации, определяемых по данным разных методов – показатель степени неоднородности распределения деформаций в пространстве и неравномерности их развития во времени. Станция «Королево» в центральной части Закарпатского внутреннего прогиба регистрирует в соответствии с тектоникой региона интенсивное расширение пород в широтном направлении. Наблюдения на станции «Королево» дают весомое подтверждение представительности данных локальных наблюдений при изучении региональных тектонических процессов. Факт аномально интенсивного развития деформации на станции «Королево», если он будет подтвержден длительными и качественными наблюдениями, открывает возможность использовать эту станцию в качестве индикатора изменений в характере тектонических процессов.

Литература

1. Рогожин Е.А., Захарова А.И. Палеоземлетрясения и сейсмический режим подвижных систем Северной Евразии // Напряженно-деформированное состояние и сейсмичность литосферы. – Новосибирск, 2003. – С.150–152.
2. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. – М.: ИФЗ РАН, 1991. – 219с.
3. Вербицкий Т., Кендзера А., Кузнецова В., Кутас Р., Латынина Л. и др. Методика обработки и анализа данных геофизического мониторинга сейсмотектонических процессов в Закарпатье и его результаты // Геофиз. журн. – 2000. – Т. 22, № 3. – С.9–17.
4. Вербицкий Т.З., Латынина Л.А. Локальные деформационные измерения как метод геодинамических исследований // VIII Міжнародний науково-технічний симпозіум «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища – GPS і GIS-технології» 1-6 вересня 2003 р., Алушта (Крим) (збірник матеріалів). – Львів. – 2003. – С. 60–62.
5. Латынина Л.А. Локальные деформационные измерения как метод изучения геодинамических процессов. Очерки геофизических исследований. 75-летие ИФЗ. – М.: ОИФЗ РАН. – 2003–2004. – С. 377–383.
6. Прилепин М.Т., Баранова С.М. О нормировке деформаций, измеренных с помощью GPS // Геофизические исследования. – М.: ИФЗ РАН. – 2005. – Вып. 3. – С.116–122.
7. Вербицкий Т.З., Игнатишин В.В., Латынина Л.А., Юркевич О.И. Современные дефор-

- мации земной коры Береговой горстовой зоны // Геодинамика. – 1998. – № 1(1) – С. 118–120.
8. Латынина Л.А., Вербицкий Т.З., Варга П., Варга Т., Юркевич О.И. Современные движения Паннонского бассейна по экстензометрическим данным // ДАН. – 1998. – № 1. – С.114–116.
 9. Results of exensometric, microseismic and other regime investigations. Janusz Sledzinski (editor), Varga P., Verbitsky T., Latynina L., Brimich L. // Geodynamics of Northern Carpathians. Reports on Geodesy. CEI CERGOP Study Group № 8. Geotectonic. Analysis of the Region of Central Europe. Warsaw University of Technology. – 1998. – Part 3.2. – P.109–111.
 10. Варга П., Вербицкий Т.З., Латынина Л.А., Садечки-Кардош Д.и др. Горизонтальные деформации земной коры в Карпатском регионе // НТР. №7 (58), 2002 г. – 2003. – 1(59). – С. 5–8.
 11. Васильев И.М., Боярский Э.А., Суворова И.И. Исследование наклонов и деформаций на геофизической станции Протвино. М.: Физика Земли. – 2001. – № 9. – С. 10–17.
 12. Сомов В.И., Рахимова И.Ш. Современные движения земной коры Карпато-Балканского региона. – Киев: Наук. думка, 1983. – 144 с.
 13. Гусева Т.В., Мишин А.В., Сковородкин Ю.П. Современные горизонтальные движения на разных масштабных уровнях // Физика Земли. – 1996. – № 12. – С. 86–91.
 14. Малеев Е.Ф. Неогеновый вулканизм Закарпатья. – М.: Наука. – 1964. – 250 с.
 15. Чекунов А.В. Принципы строения и эволюции тектоносферы юга европейской части СССР // Геотектоника. – 1987. – № 5 – С.25–41.
 16. Третьяк К.Р., Серант О.В. Результаты определения современных горизонтальных деформаций земной поверхности на территории Центральной Европы // Вестник геодезии и картографии. – 2002. – № 2(25) – С. 13–19.

ВИВЧЕННЯ СУЧАСНИХ РУХІВ ЗЕМНОЇ КОРИ ЗА ДАНИМИ ПІДЗЕМНИХ ДЕФОРМАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ

Л.А. Латиніна

Порівнюються характеристики геодезичного методу вивчення сучасних рухів земної кори і методу локальних вимірювань, що проводяться на деформаційних станціях. Розглядаються дані мережі підземних деформаційних станцій в Карпатському регіоні. За даними станцій «Мужієво» і «Берегово» показано, що головні осі полів деформацій у західній частині Закарпаття мають широтне і меридіональне простягання. По широтному напрямку відбувається інтенсивний стиск порід. Порівнюються результати станційних спостережень і результати багаторічних геодезичних вимірювань, проведених в Австро-Угорщині. Структура полів деформацій у західній частині Закарпатського прогину за цими даними і даними станцій в районі Берегового співпадає. У центральній частині Закарпаття на межі з Вигорлат-Гутинською вулканічною грядою станція «Королево» реєструє інтенсивне розширення порід в широтному напрямі. Наводяться дані геологічних і геофізичних досліджень, які підтверджують об'єктивність отриманих результатів.

STUDY OF RECENT MOVEMENTS OF THE EARTH CRUST BY THE DATA OF THE UNDERGROUND DEFORMATION STATIONS

L.A. Latynina

The character of a geodetic method of study of recent movements of the rocks and method of local measurements are compared. The network of underground deformation stations in Carpathians is considered. The results of station observations and the results of the long-term geodetic measurements which have been carried out in Austria-Hungary are compared. The structure of fields of deformations in western part of the East Carpathians on these data and data of two stations «Muzhievo» and «Beregovo» coincide. The main axes of a field of the deformations have latitude and meridian directions. There is an intensive compression in the latitude azimuth. In east part of the east Carpathians on border with Vigorlat-Guta volcanic ridge the station «Korolevo» registers intensive expansion of the surface in latitude direction. The data of geological and geophysical researches confirm objectivity of the received results.