

УДК 551.24 + 528.02

**В.С. Захаров<sup>1</sup>, Д.А. Симонов<sup>2</sup>****АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ДИСКРЕТНЫХ ДВИЖЕНИЙ БЛОКОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ГЕОДИНАМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ ПО ДАННЫМ GPS**

Предложены оригинальные алгоритмы, позволяющие на основании анализа данных GPS выделять совокупности точек (кластеры) поверхности, совершающих в настоящее время согласованное движение. Это движение может быть описано единым вектором угловой скорости. Выделенные кластеры интерпретируются как жесткие блоки. Разработаны методы определения относительных движений блоков. Возможности метода демонстрируются на пример анализа блоков в Западной Турции.

*Ключевые слова:* геодинамика, GPS, кинематика, блоки земной коры, полюсы Эйлера, относительные движения.

We apply the original algorithms, which allow on the base of GPS data analysis to detect sets of surface points (clusters), moving in concord. This motion can be characterized by unified angular-velocity vector. Detected clusters are interpreted as rigid blocks. Methods of calculation relative blocks movements are developed. Method capabilities are demonstrated on an example of analysis of blocks in the Western Turkey.

*Key words:* geodynamics, GPS, kinematics, crust blocks, Euler pole, relative movements.

**Введение.** В последнее время для решения задач современной геодинамики, для определения современных величин и значений скорости смещений земной поверхности все шире используются высокоточные измерения GPS — глобальной системы позиционирования. Система GPS позволяет привязывать результаты измерений смещения и скорости к единой системе координат. Это дает возможность сопоставлять и объединять данные различных сетей пунктов GPS в том случае, если объединяемые сети имеют хотя бы несколько общих пунктов привязки и хорошо известны временные интервалы проведения измерений. За последние годы в геодинамически активных областях, таких как Эгейско-Анатолийский регион, Южная Калифорния, Япония, проведено множество измерений, а также сделаны первые попытки объединить данные различных сетей. В результате получены достаточно представительные наборы данных для анализа не только глобальных движений плит и микроплит, но и предприняты первые попытки определить дискретные перемещения блоков, что представляет собой новое направление исследований. Такие работы ранее не проводились, с одной стороны, из-за недостатка данных, а с другой — до сих пор не были разработаны методики.

К одной из наиболее ранних работ, проведенных в указанном направлении, можно отнести работу [Kahle et al., 2000], в которой проанализированы значения скорости смещения пунктов GPS в зонах, по которым проходят границы Евразийской, Аравийской и Африканской плит, и рассчитаны значения скорости деформаций в этих зонах. В работе [Reilinger

et al., 2006] на основе анализа данных GPS для зоны взаимодействия этих плит разработана модель упругих блоков, которая согласуется с современными движениями плит (относительно эйлеровых полюсов), величинами деформаций в межплитных зонах и значениями скорости деформаций по основным разломам.

В работе [McClusky et al., 2000] выполнен предварительный анализ и объединено множество высококачественных данных GPS от Западной Греции до Эгейской дуги и Западной Турции. Указанные авторы использовали эти результаты, чтобы выделить жесткие блоки в Центральной Анатолии и на юге Эгейского региона, в частности они первыми идентифицировали южную Эгейскую микроплиту и рассчитали ее движение от востока Эгейского региона к Юго-Западному Пелопоннесу.

Хорошее обобщение эволюции представлений о геодинамике Эгейской области представлено в работе [Nyst, Thatcher, 2004], где предложена количественная модель с четырьмя микроплитами, которая позволяет достаточно хорошо описать современную динамику Эгейского региона, однако проведенный анализ предполагает существование изолированных зон деформации в пределах номинально жестких микроплит.

Сходные по направлению исследования проводятся и для других регионов. Ряд работ посвящен анализу блоковой динамики зоны сочленения Тихоокеанской и Североамериканской плит на основании данных GPS [McCaffrey, 2005; Meade, Hager, 2005; Prawirodirdjo, Bock, 2004; Williams et al., 2006]. Эти

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, доцент, канд. физ.-мат. н., e-mail: vszakharov@dynamo.geol.msu.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, ст. науч. с., канд. геол.-минер. н., e-mail: simon@geol.msu.ru

исследования носят весьма детальный характер, учитывая качество сети GPS на западе США, в частности в Калифорнии.

Перечисленные выше исследования, при всех различиях методики определения количественных характеристик блоковых движений, отличаются общим подходом к проблеме выделения блоков. Сначала по геологическим, тектоническим, геоморфологическим и т.п. данным выделяются относительно жесткие (или жестко-упругие) блоки и их границы, а затем уже анализируются данные по пунктам GPS, попавшим в тот или иной блок, и вычисляются кинематические характеристики движений (полюсы вращения, значения угловой скорости, относительные движения).

Несколько иной подход предложен и реализован в работах [Зубович и др., 2004, 2006, 2007; Кузиков, 2007; Bogomolov et al., 2007] для анализа современной деформации земной коры Центральной Азии по данным GPS. В них разработаны методы выделения минимально деформируемых участков земной коры на основе дискретного набора значений горизонтальной скорости, выявления доменной (блоковой) структуры поля современных движений для региона развертывания центральноазиатской GPS-сети. Кроме того, перечисленные авторы определили пространственные соотношения между неотектоническими разрывными структурами, доменами и зонами между ними, а также исследовали кинематику этих объектов. Выделение блоков проводится главным образом на основании анализа кинематики, для чего разработана сложная методика, базирующаяся на методе наименьших квадратов, при этом кривизной поверхности Земли пренебрегают, а расчеты ведутся для плоского случая.

**Цель работы** — разработать математические методы и программное обеспечение на базе ГИС, чтобы создать дискретные кинематические модели отдельных регионов по данным GPS на сферической поверхности. При этом мы не строим законченную схему блоковой динамики конкретного региона, а лишь демонстрируем возможности предлагаемой методики.

В работе [Симонов и др., 2006] кратко изложены разработанные нами методики анализа современных дискретных движений блоков геодинамически активных областей по данным GPS. Методики опробовались на примере анализа Эгейско-Анатолийского региона. Это связано с тем, что его современную геодинамику в последние 30–35 лет изучали многие исследователи, причем, как отмечено выше, собрано много данных GPS. Отдельные результаты этого анализа приводятся в статье. Кроме того, методика опробована нами на сетях GPS Южной Калифорнии, она показала хорошие результаты.

**Методика анализа.** Для анализа данных GPS и создания кинематической модели блоков нами разработана специальная методика, основанная на анализе движений на поверхности сферы. Данные о скорости GPS во всех источниках приводятся в так называемой

местной локальной декартовой системе координат, она имеет 3 компонента: северный ( $n$ ), восточный ( $e$ ) и вертикальный ( $d$ ):  $V = (V_n, V_e, V_d)$ . В данном случае нас интересуют только горизонтальные движения, поэтому везде полагаем  $V_d = 0$ . Для дальнейшего анализа значения скорости переводятся в глобальную систему координат  $V = (V_x, V_y, V_z)$ , связанную с центром Земли [Кокс, Харт, 1989].

Движения плит, особенно небольших, достаточно сложные, их можно представить, во-первых, как вращение вокруг различных полюсов, подобранных тем или иным методом; во-вторых, как вращение вокруг внутренней оси; и в-третьих, как комбинацию обоих типов движения. Так как прямые векторные операции со значениями скорости пунктов GPS в локальной системе координат могут привести к существенным ошибкам при анализе дифференциальных движений, одной из первых и основных задач становится выделение отдельных блоков, совершающих дифференциальные движения.

Стандартные методы расчета положения эйлеровых полюсов по данным о линейной скорости [Зоненшайн, Кузьмин, 1992; Кокс, Харт, 1989] мы применяли для анализа скорости отдельных пунктов GPS. В статье предложены оригинальные алгоритмы, позволяющие выделять (на основании простого перебора) наборы точек («кластеры»), принадлежащих к единому эйлерову полюсу и имеющих одинаковую угловую скорость (в пределах заданных ошибок). Иными словами, выделялись совокупности точек поверхности, совершающих в настоящее время согласованное движение, которое можно описать единым вектором угловой скорости  $\omega$ . Эти кластеры интерпретированы нами как жесткие кинематические блоки (возможно, временные), при этом критерием служила именно согласованность движения.

Далее, используя выделенные «кластеры» (блоки) и рассчитанные для них параметры движения — координаты (широта  $\phi_p$ , долгота  $\lambda_p$ ) полюса вращения  $P(\phi_p, \lambda_p)$  и угловую скорость  $\omega$ , вычислили относительные движения отдельных блоков.

**Методы классификации исходных данных и выделения кинематических блоков (кластеров).** *Базовый алгоритм (К1).* За основу при выделении кинематических блоков нами был принят наиболее простой метод, основанный на переборе. Алгоритм метода следующий:

1) имеется набор данных по  $N$  пунктам наблюдений GPS. Из набора выбираются две произвольные точки  $T_1$  и  $T_2$ , имеющие GPS-скорости  $V_1$  и  $V_2$ , эйлеров полюс которых еще не определен;

2) по направлениям скоростей  $V_1$  и  $V_2$  вычисляется положение эйлерова полюса  $P(\phi_p, \lambda_p)$  для точек  $T_1, T_2$ , как это описано в [Зоненшайн, Кузьмин, 1992];

3) для каждой точки  $T_1, T_2$  по величинам линейной скорости и вычисленному положению эйлерова полюса  $P$  формально вычисляются величины мгновенной угловой скорости —  $\omega_1, \omega_2$ .

Если значения  $\omega_1$  и  $\omega_2$  близки, т.е.  $|\omega_1 - \omega_2| \leq \Delta\omega$ , где  $\Delta\omega$  — заранее заданная точность (максимальная ошибка) определения угловой скорости  $\omega$ , то эйлеров полюс  $P$  считается правильным и запоминается, а точки  $T_1, T_2$  приписываются к этому эйлерову полюсу  $P_1$ .

Если разница  $|\omega_1 - \omega_2| \geq \Delta\omega$ , то из набора данных выбирается другая точка  $T_3$ , эйлеров полюс которой еще не определен, точку  $T_2$  заменяем на  $T_3$  и повторяем операции п. 2 и 3, пока не будут найдены хотя бы две точки, относящиеся к одному полюсу вращения  $P_1$ ;

4) из набора данных выбирается произвольная точка  $T_i$ , эйлеров полюс которой еще не определен, и вычисляются азимут движения  $A'_i$  в этой точке и угловая скорость  $\omega_i$ , которые получились бы при вращении этой точки вокруг ранее определенного полюса  $P_1$ . Эти вычисленные (пробные) значения азимута и угловой скорости сопоставляются с фактическими.

Если разница вычисленного ( $A'_i$ ) и фактического ( $A_i$ ) азимутов меньше заранее заданной ошибки азимута  $\Delta A$  ( $|A'_i - A_i| \leq \Delta A$ ), а  $\omega_i$  и  $\omega_1$  близки ( $|\omega_1 - \omega_i| \leq \Delta\omega$ ), то точка  $T_i$  относится к тому же полюсу  $P$  (принадлежит к этому блоку), если нет, то проверяются остальные точки из всего набора данных;

5) если в результате перебора всех точек остаются такие, для которых полюс вращения все еще не определен, то переходят к п. 1, чтобы найти эйлеровы полюсы  $P_2, P_3, P_4$  и т.д. для других блоков.

Можно ожидать, что к главным недостаткам метода относятся определенная зависимость от выбора начальной пары точек и потенциальная вероятность отнести точку к ложному полюсу. Однако практическое опробование метода с «перетасованными» базами данных таких недостатков не выявило. Выделенные «кластеры» были одинаковы независимо от начальной точки.

**Метод минимизации ошибок (K2).** Этот метод является модификацией метода K1 и имеет следующий алгоритм:

1) п. 1–5 совпадают с соответствующими пунктами метода K1;

...

б) еще раз проверяют все точки. Рассчитывают ошибки определения азимута и угловой скорости для вращения вокруг каждого из найденных полюсов  $P_1, P_2, P_3$  и т.д. Окончательно точка относится к тому полюсу, для которого ошибки азимута и угловой скорости минимальны.

Преимущество этого метода заключается в том, что точки относятся к полюсу, который обеспечивает наименьшие ошибки. При этом выявлен следующий недостаток: появление внутри выделяемых кластеров «посторонних» точек, которые формально относятся к одному полюсу, но фактически расположены в окружении точек, имеющих другой полюс. Это требует внимания исследователя-эксперта.

**Вариативный метод (K3).** Этот метод дополнительный для методов K1 и K2. В соответствии с

ним есть возможность вычислить для каждой точки несколько полюсов, удовлетворяющих критериям точности, т.е. предварительно каждая точка может принадлежать нескольким кластерам. Окончательное решение принимает исследователь на основании дополнительной информации. Метод имеет следующий алгоритм:

1) п. 1–5 совпадают с таковыми в методе K1;

...

б) еще раз проверяют все точки. Рассчитывают ошибки азимута и угловой скорости из каждого полюса  $P_1, P_2, P_3$  и т.д. Точка относится к полюсу, для которого разница азимута и угловой скорости меньше заданных ошибок  $\Delta A, \Delta\omega$  и удовлетворяет дополнительным критериям исследователя (тектоническим, геоморфологическим и т.п.)

Отметим, что все указанные методы не могут учесть внутреннее вращение блоков вокруг собственной оси, поэтому не существует самого правильного и наилучшего метода для классификации и определения эйлерова полюса по набору данных GPS. Поэтому описанные методы классификации, или кластеризации, являются предварительными, и более подробный анализ должен производиться экспертом-исследователем.

Выделенные таким образом наборы точек («кластеры») можно интерпретировать как принадлежащие к отдельным жестким блокам, но при подтверждении этого геологическими данными.

**Методы вычисления относительных движений блоков.** Для изучения относительного перемещения плит или блоков нужно вычислить значения скорости относительных движений. Мы предлагаем четыре метода вычисления относительных движений, которые можно применять в зависимости от решаемых задач и качества исходных данных.

**Метод O1.** В этом методе вычисление относительных движений блоков осуществляется через вычитание значений линейной скорости пунктов в локальной системе координат. Метод имеет следующий алгоритм (рис. 1):

1) выбирается точка  $T_1$ , которая имеет локальную линейную скорость  $V_{T_1} = (V_{T_1n}, V_{T_1e})$ ;

2) для любой другой точки  $T_2$ , имеющей скорость в локальной системе  $V_{T_2} = (V_{T_2n}, V_{T_2e})$  скорость относительно точки  $T_1$  ( $V' = V_{T_2} - V_{T_1}$ ) имеет компоненты  $V'_n = V_{T_2n} - V_{T_1n}$  и  $V'_e = V_{T_2e} - V_{T_1e}$ .

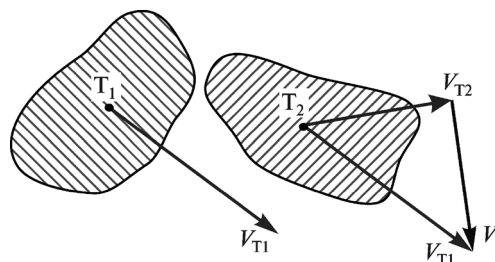


Рис. 1. Схема вычисления скорости относительного движения по методу O1. Пояснения см. в тексте

**Метод О2.** В этом методе сначала осуществляется пересчет значений скорости из локальной в глобальную систему координат. Вычисление относительных движений блоков осуществляется через вычитание значений линейной скорости пунктов в глобальной системе координат. Окончательно относительные значения линейные скорости пересчитываются обратно в локальную систему.

Оба эти метода (О1 и О2) дают приемлемые результаты при отсутствии больших вращений блоков и удобны для вычисления относительного движения близких локальных пунктов (когда сферичностью поверхности Земли можно пренебречь). К недостаткам методов относится то, что можно получить относительные движения точек в самом блоке.

Для случаев, когда движения блоков имеют хорошо выраженное вращение вокруг эйлера полюса, т.е. даже в грубом приближении их движение нельзя рассматривать как поступательное, разработаны методы О3 и О4.

**Метод О3** позволяет определить относительные движения точек, вычисляя скорость их движения в локальной системе при вращении вокруг разных полюсов и находя разность полученных величин. Метод имеет следующий алгоритм (рис. 2):

1) выбирается блок, который вращается вокруг полюса  $P(\phi_p, \lambda_p)$  с угловой скоростью  $\omega$  (т.е. характеризуется вектором угловой скорости  $\omega$ );

2) выбирается точка  $T(\phi, \lambda)$ , которая может принадлежать к другому блоку с другим полюсом вращения  $P_2$ , ее фактическая (измеренная) скорость в локальной системе —  $V_T = (V_n, V_e)$ ;

3) вычисляется скорость  $V_{TP}$  вращения точки  $T$  относительно полюса  $P$  (как если бы она относилась к полюсу  $P$ ) в глобальной системе  $V_{TP} = [\omega \mathbf{r}]$ , где  $\mathbf{r} = (r_x, r_y, r_z)$  — радиус-вектор точки  $T$  (в глобальной системе координат). Компоненты относительной скорости  $V_{TPx} = \omega_y r_z - \omega_z r_y$ ,  $V_{TPy} = \omega_z r_x - \omega_x r_z$ ,  $V_{TPz} = \omega_x r_y - \omega_y r_x$ ;

4) скорость  $V_{TP}$  пересчитывается в локальную систему координат;

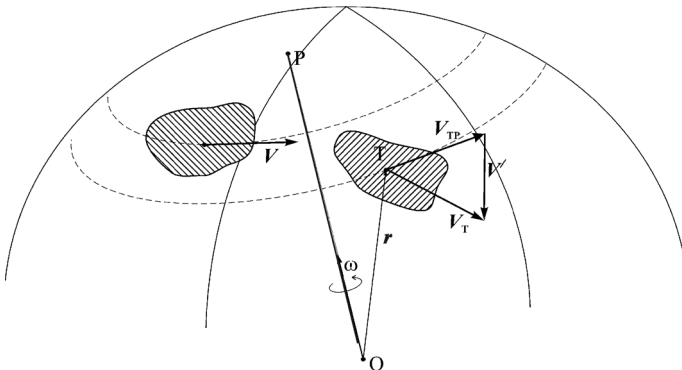


Рис. 2. Схема вычисления скорости относительного движения по методу О3. Пояснения см. в тексте

5) вычисляется относительная скорость в локальной системе  $V' = V_T - V_{TP}$ , которая имеет компоненты  $V'_n = V_n - V_{TPn}$ ,  $V'_e = V_e - V_{TPe}$ .

Результаты, полученные методом О3, корректнее, чем полученные методами О1 и О2. Недостатком является возможность получить движение точки относительно своего блока. Это связано с тем, что при кластеризации мы относили точки к блоку с определенной погрешностью, поэтому значимыми следует считать только те движения, количественные характеристики которых больше заданных ошибок.

**Метод О4.** В этом методе определение относительных движений блоков производится через их угловые скорости и координаты эйлеровых полюсов (т.е. вектор угловой скорости) в глобальной системе координат. Метод имеет следующий алгоритм (рис. 3):

1) выбирается блок 1, имеющий эйлеров полюс  $P_1(\phi_1, \lambda_1)$ , вектор угловой скорости  $\omega_1$  и точка  $T$ , относящаяся к блоку 2, который имеет эйлеров полюс  $P_2(\phi_2, \lambda_2)$ , вектор угловой скорости  $\omega_2$ ;

2) вычисляется угловая скорость блока 2 относительно блока 1  $\omega' = \omega_2 - \omega_1$ ;

3) вычисляется относительная линейная скорость точки  $T$  в глобальной системе координат  $V' = [\omega' \mathbf{r}]$ , где  $\mathbf{r} = (r_x, r_y, r_z)$  — радиус-вектор точки  $T$  (в глобальной системе координат). Компоненты относительной скорости  $V'_x = \omega'_y r_z - \omega'_z r_y$ ,  $V'_y = \omega'_z r_x - \omega'_x r_z$ ,  $V'_z = \omega'_x r_y - \omega'_y r_x$ ;

4) вычисляется скорость относительного движения в локальной системе координат.

В этом методе точки в самом блоке остаются неподвижными одна относительно другой в пределах заданной ошибки, если блок не испытывает внутреннего вращения. Метод работает при любых обстоятельствах, при этом получаются наиболее корректные результаты.

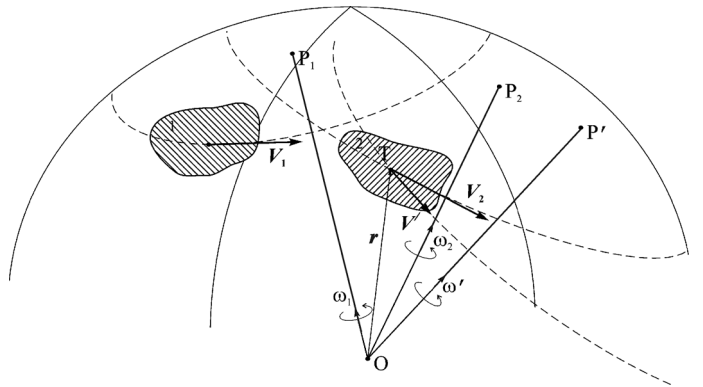


Рис. 3. Схема вычисления скорости относительного движения по методу О4. Пояснения см. в тексте

**Применение методов на примере выделения блоков и определения их кинематики в Западной Турции.** Приведенная методика опробована при анализе данных, представленных в [Nyst, Thatcher, 2004] для Эгейско-

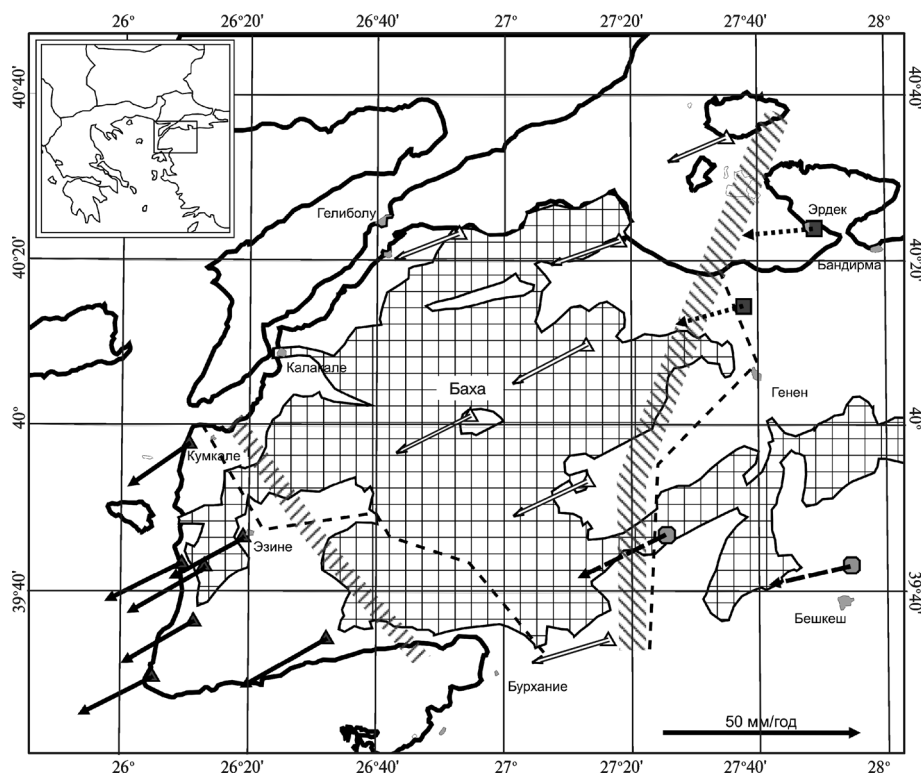


Рис. 4. Выделение кинематических блоков методом K2 для тестового региона в Западной Турции (показан на врезке рамкой). Пункты, отнесенные к различным блокам, показаны различными значками, их скорости — разными стрелками. Широкие штриховые полосы — примерные границы выделенных блоков с учетом геологических данных; пунктирные линии — более точное определение границ блоков по геоморфологическим данным

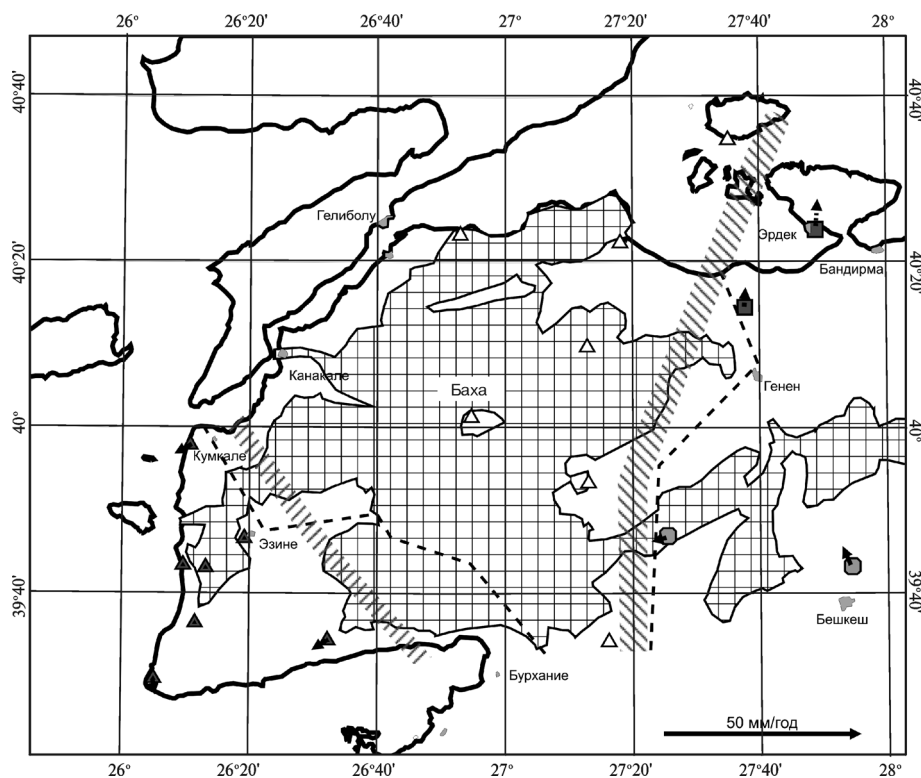


Рис. 5. Скорость движения блоков (стрелки), полученная по методу O1, относительно пункта Баха. Условные обозначения см. рис. 4

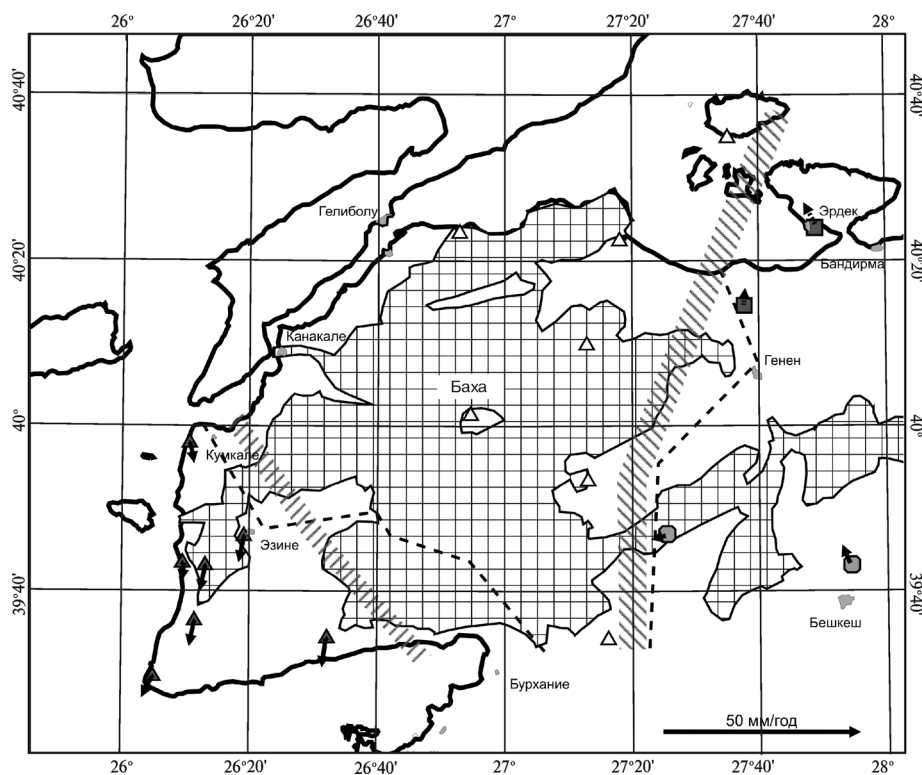


Рис. 6. Скорость движения блоков (стрелки), полученная по методу O4, относительно пункта Баха. Условные обозначения см. рис. 4

Анатолийского региона. Классификация проводилась со следующими параметрами: допустимая ошибка в угловой скорости составляла  $\pm 15\%$ , допустимое отклонение вектора движения —  $\pm 5^\circ$ . Нами предварительно выбрано и описано лишь несколько наиболее четко выделяющихся блоков, по всей видимости, не имеющих значительного собственного вращения и характеризующихся — в первом приближении — достаточно простым поступательным движением. Выбор конкретных блоков обусловлен представительностью исходных данных GPS и геологических данных.

В результате анализа удалось выделить ряд блоков, имеющих различные полюса вращения и, таким образом, совершающих дифференциальные движения. Границы блоков подтверждаются геологическими данными. Объем статьи не позволяет полностью представить полученные результаты, поэтому здесь приводится только один пример, демонстрирующий взаимоотношения блоков в Западной Анатолии.

В первую очередь отметим, что при выделении отличающихся по кинематике блоков земной коры нельзя опираться только на формальные математические методы, так как такое определение может содержать значительные ошибки, связанные с ограничениями методов как кластеризации, так и определения относительных движений. Необходим тщательный анализ геологического строения и морфологии рельефа изучаемых территорий. Однако здесь возникают дополнительные сложности, связанные с тем, что границы современных подвижных блоков не всегда

четко коррелируют с геологическими и морфологическими данными.

Так, хорошо выраженные в рельефе линейные зоны, которые могли бы быть интерпретированы при дешифрировании как активные границы блоков, на современном этапе могут оказаться пассивными. Относительные движения пунктов, которые расположены на разных бортах хорошо морфологически выраженных и спрямленных долин, обычно интерпретируемых как разрывные нарушения, могут быть либо крайне незначительны, либо отсутствовать. Кроме того, движение этих пунктов можно описать как вращение единого блока вокруг единого полюса. С другой стороны, границы отдельных подвижных один относительно другого блоков могут не иметь четкого морфологического проявления, хотя некоторые морфологические признаки могут свидетельствовать о развивающихся активных структурах. Здесь можно говорить скорее о выделении неких областей с различной кинематикой (рис. 4–6), границы которых (широкие штриховые полосы) точно определить довольно сложно. В данном случае при определении границ блоков учитывалось, что пункты, относимые к разным эйлеровым полюсам, приурочены к областям с различным геологическим строением. Так, пункты на мысе Баба (пункты показаны серыми треугольниками, значения скорости — стрелками) приурочены к областям распространения миоцен-четвертичных отложений, в то время как пункты блока с центральной точкой Баха (пункты показаны

белыми треугольниками, значения скорости — белыми стрелками) приурочены к областям выхода метаморфизованного фундамента (заштрихованные поля на рис. 4–6). Более точное определение границ блоков (пунктирные линии) возможно по геоморфологическим данным, однако плотность сети GPS не позволяет говорить о них уверенно.

Что касается относительных движений выделенных блоков, то, как видно на рис. 5, движения, рассчитанные по методу О1 (относительно пункта Баха), незначительны, а скорость движений, рассчитанных по методу О4 (рис. 6), достигает 5–10 мм/год. Такая разница связана с положением эйлеровых полюсов выделенных блоков, а также с взаимным расположением самих блоков (рис. 7). При такой конфигурации метод О1, при котором расчет относительных движений ведется в локальной декартовой системе координат, будет заведомо давать ошибку в определении скорости относительных движений. Более корректен метод О4. Полученный результат можно продемонстрировать на примере близко расположенных маятников, закрепленных в различных точках (см. врезку на рис. 7). При повороте маятников векторное вычитание значений их линейной скорости даст весьма незначительную скорость относительных движений, в то время как смещение блоков маятников будет весьма заметным.

**Заключение.** Предложены математические методы и разработано программное обеспечение на базе ГИС для создания дискретных кинематических моделей отдельных регионов по данным GPS с учетом сферичности поверхности Земли. Предварительный кинематический анализ показал, что данные GPS можно использовать не только для определения движения плит и микроплит, но и для определения и выявления небольших подвижных блоков, отражающих внутреннюю дифференцированную кинематику более мелких структурных элементов. Однако при этом наряду с анализом поля скоростей необходим тщательный анализ геологической информации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И. Палеогеодинамика. М.: Наука, 1992. 192 с.
- Зубович А.В., Бейсенбаев Р.Т., Сяочан В. и др. Современная кинематика Тарим–Тянь-Шань–Алтайского региона Центральной Азии (по данным GPS измерений) // Физика Земли. 2004. № 9. С. 31–40.
- Зубович А.В., Макаров В.И., Кузиков С.И. и др. Внутриконтинентальное горообразование в Центральной Азии по данным спутниковой геодезии // Геотектоника. 2007. № 1. С. 16–29.
- Зубович А.В., Мосиенко О.И., Кузиков С.И., Меллорс Р. Изучение современной тектоники Тянь-Шаня по данным космической геодезии // Области активного тектогенеза в современной и древней истории Земли: Мат-лы 39-го Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2006. Т. 1. С. 243–244.

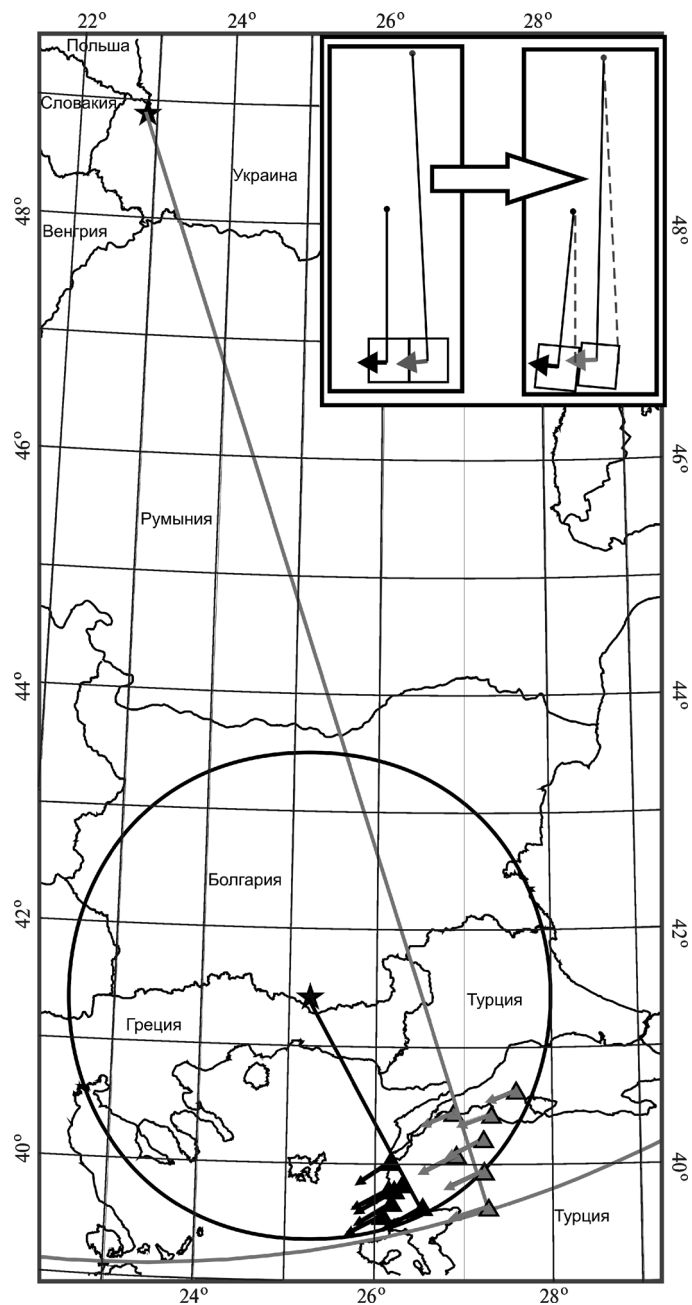


Рис. 7. Взаимное расположение эйлеровых полюсов (звездочки) выделенных блоков и скорости вращения (стрелки). На врезке показана модель относительного движения блоков при данном расположении полюсов вращения

- Кокс А., Харт Р. Тектоника плит. М.: Мир, 1989. 427 с.
- Кузиков С.И. Структурный анализ горизонтальных скоростей по данным GPS и характер современной деформации земной коры Центральной Азии: Автореф. канд. дис. М., 2007. 26 с.
- Симонов Д.А., Захаров В.С., Лю С. Методики анализа современных дискретных движений блоков геодинамически активных областей по данным GPS (на примере Эгейско-Анатолийского региона) // Области активного тектогенеза в современной и древней истории Земли: Мат-лы 39-го Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2006. Т. 2. С. 215–219.
- Bogomolov L., Bragin V., Fridman A. et al. Comparative analysis of GPS, seismic and electromagnetic data on the central Tien Shan Territory // Tectonophysics. 2007. Vol. 431. P. 143–151.

*Kahle H.-G., Cocard M., Peter Y.* et al. GPS-derived strain rate field within the boundary zones of the Eurasian, African, and Arabian Plates // *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105, N B10. P. 23353–23370.

*McCaffrey R.* Block kinematics of the Pacific–North America plate boundary in the southwestern United States from inversion of GPS, seismological, and geologic data // *Ibid.* 2005. Vol. 110, N B07401 (doi:10.1029/2004JB003307).

*McClusky S., Balassallian S., Barka A.* et al. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus // *Ibid.* 2000. Vol. 105, N B3. P. 5695–5719.

*Meade B.J., Hager B.H.* Block models of crustal motion in southern California constrained by GPS measurements // *Ibid.* 2005. Vol. 110, N B03403 (doi:10.1029/2004JB003209).

*Nyst M., Thatcher W.* New constraints on the active tectonic deformation of the Aegean // *Ibid.* 2004. Vol. 109, N B11406 (doi:10.1029/2003JB002830).

*Prawirodirdjo L., Bock Y.* Instantaneous global plate motion model from 12 years of continuous GPS observations // *Ibid.* 2004. Vol. 109, N B08405. (doi: 10.1029/2003JB002944).

*Reilinger R., McClusky S., Vernant P.* et al. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions // *Ibid.* 2006. Vol. 111, N B05411 (doi:10.1029/2005JB004051).

*Williams T.B., Kelsey H.M., Freymueller J.T.* GPS-derived strain in northwestern California: Termination of the San Andreas fault system and convergence of the Sierra Nevada–Great Valley block contribute to southern Cascadia forearc contraction // *Tectonophys.* 2006. Vol. 423. P. 171–184.

Поступила в редакцию  
24.03.2009