



Об учете динамических эффектов при установлении государственной системы координат на примере прототипа ГСК-2035

Л.А. Липатников¹✉

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
Новосибирск, Россия

✉ lipatnikov_l@mail.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Липатников Л.А. Об учете динамических эффектов при установлении государственной системы координат на примере прототипа ГСК-2035 // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 5. С. 8–21. DOI:10.30533/GiA-2025-043.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА государственная система координат, координатная основа, трансформирование, деформация, движение литосферных плит

АННОТАЦИЯ Статья посвящена вопросу о преодолении фактически существующего (обусловленного несоответствием теоретического определения государственной системы координат ГСК-2011 ее назначению) ограничения точности координатного обеспечения в России на дециметровом уровне. Сформулированы критерии оптимальности определения государственной системы координат с точки зрения экономически наиболее эффективного удовлетворения запросов основных групп пользователей на интервале более 20 лет. Представлено определение и способ реализации прототипа альтернативной системы координат ГСК-2035 с учетом физической деформации территории. В ГСК-2035 обеспечивается постоянство координат объектов недвижимости, однозначная связь с общеземными системами координат на субсантиметровом уровне точности для всей территории России при максимальной простоте преобразований. Прямоугольные координаты в ГСК-2035 и ITRF2020 будут численно близки на интервале 15 лет после ввода предложенной системы, что делает ее оптимальной для создания единой картографической основы и осуществления навигации повышенной точности по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем без трансформирования. Для достижения наивысшей точности преобразований в ГСК-2035 в $\frac{3}{4}$ случаев на территории РФ достаточно стандартной модели Гельмерта с учетом скоростей изменения параметров. В остальных случаях высокая точность достигается применением постоянного поля скоростей и локальных поправок, являющихся неотъемлемой частью

ГСК-2035. Преобразования координат полностью автоматизированы. Внедрение системы координат с представленными характеристиками является необходимым условием реализации единого высокоточного геоинформационного пространства и соответствующего навигационного поля на всей территории страны, а также повышения эффективности высокоточного координатного обеспечения на один-два порядка.

1 Введение

Реализация земной системы координат (СК) является одной из фундаментальных задач единой системы координатно-временного и навигационного обеспечения [1]. Земные системы координат ГСК-2011 и ПЗ-90.11 установлены в качестве единых государственных СК РФ постановлениями Правительства РФ^{1,2}. Определение СК, приведенное в этих документах, во многом задает способ реализации и, как следствие, предельный уровень точности данных СК, т. е. уровень соответствия реально измеряемых геометрических величин и величин, вычисленных по координатам с учетом необходимых преобразований. Создание ГСК-2011 можно считать началом современного этапа развития отечественной геодезии, т. к. на смену СК-42 и СК-95 пришла трехмерная геоцентрическая СК, максимально приближенная к ITRF (*англ.* International Terrestrial Reference Frame) на начальную эпоху [2]. Это позволило снять ряд проблем и способствовало широкому внедрению спутниковых технологий, повышению достижимой точности выполнения геодезических работ, а вслед за этим и повышению требований пользователей к точности, в результате чего на первый план сейчас выходит проблема, вероятно, ранее казавшаяся неочевидной. Проблема заключается в значительной деградации точности координатной основы ГСК-2011 со временем. Из-за отсутствия стандартного алгоритма учета динамических эффектов неучитываемая деформация (и, соответственно, погрешность) координатной основы ГСК-2011 постоянно накапливается со скоростью до 1 дм за десятилетие и в настоящее время уже превышает 1 дм для территорий Дальнего Востока. Данная проблема препятствует созданию и долговременному поддержанию на территории России единого высокоточного геоинформационного пространства, соответствующего точности геодезических измерений. Решение проблемы неизбежно будет связано с заменой ГСК-2011, т. к. переопределение модели связи СК с другими системами фактически создает новую реализацию СК.

Решению проблемы установления высокоточных СК для целей геодезии и картографирования российских и сопредельных территорий, а также созданию технических и организационных условий для этого посвящены работы [2–7]. Зарубежный опыт учета динамических эффектов в государственных СК представлен в статье [8]. Моделирование движения литосферных плит для практического применения в геодезии также рассмотрено в работе [4], подготовленной параллельно с настоящим исследованием в рамках НИР «ГЕОТЕХ-Квант».

Цель настоящей работы — представить теоретическое определение и конкретный способ реализации альтернативного варианта государственной СК, позволяющего наиболее эффективно удовлетворять запросы основных групп пользователей координатной основы на интервале более 20 лет.

1 Постановление Правительства РФ от 28 декабря 2012 г. № 1463 «О единых государственных системах координат». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://government.ru/docs/7187> (дата обращения: 28.04.2025).

2 Постановление Правительства РФ от 24 ноября 2016 г. № 1240 «Об установлении государственных систем координат, государственной системы высот и государственной гравиметрической системы». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://government.ru/docs/all/109124> (дата обращения: 28.04.2025).

В настоящее время терминология, необходимая для рассмотрения вопроса, не полностью определена российскими нормативными документами, имеются значительные расхождения в международных и отечественных стандартах^{3,4,5}. Поэтому уточним некоторые термины, применяемые в настоящей статье.

Под системой координат будем понимать совокупность ее теоретического определения (*англ.* reference system) и практической реализации — координатной основы.

В современных международных стандартах принято выделять статическую (*англ.* static reference frame) и динамическую (*англ.* dynamic reference frame) координатную основу. В первой координаты объекта постоянны, если он неподвижен относительно локального участка земной поверхности. В динамической координатной основе все объекты движутся вместе с блоками земной коры. Учет движения точек (*англ.* point motion operation) происходит непосредственно в динамической координатной основе: смещение каждой точки рассчитывается по модели ее движения, включающей координаты в начальную эпоху, скорость и в некоторых случаях другие элементы.

Для дальнейшего рассмотрения также выделим две группы земных СК по их функциональному назначению:

- предназначенные для решения задач космической геодезии — их принято называть общеземными СК (ОЗСК);
- служащие для формирования геоинформационного пространства (ГИСК), используемые на практике в географических информационных системах (ГИС), системах автоматизированного проектирования (САПР), а также при выполнении геодезических работ на локальных участках классическими наземными методами.

ОЗСК, такие как ITRS/ITRF, ПЗ-90.11 и WGS84, применяются в глобальном масштабе, для их использования важна корректная связь с небесной СК ICRS/ICRF, поэтому соответствие ориентировки осей ОЗСК определениям Международной службы вращения Земли и систем отсчета является обоснованным. На практике такие СК всегда являются динамическими. Определение координат в ОЗСК при помощи глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) достаточно хорошо автоматизировано и может выполняться с погрешностями менее 1 см. Неудобство использования ОЗСК для решения практических задач заключается в том, что высокоточные координаты всегда необходимо относить к эпохе их определения, без указания которой возникает неопределенность порядка одного метра. Из-за наличия скоростей и других элементов модели движения каждой точки, а также необходимости указывать для каждой точки эпоху в ОЗСК затруднительно вести базы геопространственных данных.

Для целей применения ГИСК, напротив, важнее, чтобы координаты точек земной поверхности оставались неизменными как можно дольше, т. к. на этом интервале времени упрощается ведение баз геопространственных данных. К ГИСК можно отнести СК-95, СК-42, местные, условные СК. В настоящее время также ГСК-2011 трактуется как статическая в соответствии с Объяснением к геодезической системе координат 2011 года⁶. Недостаток ГИСК состоит в том, что высокую точность ее реализации в глобальном масштабе можно обеспечить лишь на коротком интервале времени. Чем обширнее территория, тем сложнее поддерживать координатную основу в актуальном состоянии из-за накапливающейся физической деформации.

Потенциально достижимая точность координатно-временного и навигационного обеспечения на данном этапе развития геодезии во многом определяется

3 ГОСТ 22268-76. Геодезия. Термины и определения. М.: Госстандарт, 1980. 32 с.

4 ISO 19111:2019. Geographic information – Referencing by coordinates. ISO/TC 211, 2020. 143 p.

5 ГОСТ Р 52572-2006. Географические информационные системы. Координатная основа. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2006. 11 с.

6 Ефимов Г.Н., Зубинский В.И., Попадьев В.В. Объяснение к геодезической системе координат 2011 года. М.: ЦГКиИПД, 2021. 165 с.

тем, насколько высокую точность преобразования координат возможно обеспечить при переходе между ГИСК и ОЗСК, т. к. именно эта связь является слабым звеном единой системы координатно-временного и навигационного обеспечения. Техническая сторона автоматизации преобразований в этом звене рассмотрена в работе [9], однако для реализации корректного, однозначного и высокоточного преобразования координат необходимо устранить ряд пробелов в определении государственной СК.

Действующая государственная система координат ГСК-2011 была введена постановлением Правительства РФ одновременно с ПЗ-90.11, изначально предназначенной для использования в целях геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач. ПЗ-90.11 является ОЗСК в чистом виде. ГСК-2011 предназначена для решения задач геодезии и картографии, т. е., по сути, для формирования геоинформационного пространства, и поэтому отнесена к классу ГИСК.

При этом ГСК-2011 и ПЗ-90.11 определены в постановлениях Правительства одинаково в части ориентировки их осей. Согласно определению, ориентировка осей ГСК-2011 идентична ITRS, из чего следует, что скорости точек земной поверхности в этой СК будут сопоставимы со скоростями в ITRF. При таком определении вся территория РФ в ГСК-2011 должна двигаться со скоростью до 3 см в год и деформироваться со скоростью до 1 см/год, преимущественно на Дальнем Востоке, из-за взаимного движения литосферных плит. За период, прошедший с момента установления ГСК-2011, это соответствует изменению координат на всей территории РФ на величину порядка 4 дм. Проблема заключается в том, что определение ГСК-2011 и ее практическая реализация не содержат алгоритмов учета движения и деформации территории, что на практике приводит к возникновению ошибок соответствующего порядка.

Для устранения указанной неоднозначности было выпущено Объяснение к геодезической системе координат 2011 года, согласно которому ГСК-2011 фактически применяется на эпоху 2011.0 как статическая система координат. Согласно этому документу, область действия системы ГСК-2011 «ограничена территорией России, поэтому общие изменения координат, вызванные смещениями в мировой системе, можно игнорировать до установления новой реализации системы. Изменения координат пунктов, вызванные изменением конфигурации сети ФАГС из-за тектонических изменений, превысят 10 см (точность топографических планов), по разным оценкам, за 30–40 лет»⁷. Приведенная в Объяснении к геодезической системе координат 2011 года оценка является чрезмерно оптимистичной. Каталоги координат в ГСК-2011 рассогласуются с фактическими результатами измерений в несколько раз быстрее: со скоростью до 1 дм за десятилетие, — что отмечалось в работах [5, 10] и что несложно проверить на основе анализа скоростей смежных пунктов Фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС), например МАГ1 и ОХТК [9]. Поэтому в ГСК-2011 невозможно обеспечивать на интервале более трех лет повсеместное выполнение требования ГОСТ Р 57374-2016 к средней квадратической погрешности взаимного положения пунктов ФАГС (не более 2 см в плане).

Идеальным определением ГИСК представляется такое, при котором в ней координаты точек земной поверхности постоянны на протяжении десятилетий, преобразование координат в другие СК выполняется просто и при этом обеспечивается точность представления реальной геометрии объектов, соответствующая инструментальной точности геодезических измерений на всей территории страны. Очевидно, что невозможно достичь всего этого одновременно для быстро деформируемой территории. Необходимо найти оптимальное решение. При этом задача усложняется тем, что для разных групп пользователей критерии оптимальности будут иметь разный вес. Для геодезических применений наиболее важна предельная точность реализации СК и привязки к ней. Для подавляющего большинства пользователей, например в области умного

⁷ Ефимов Г.Н., Зубинский В.И., Попадьев В.В. Объяснение к геодезической системе координат 2011 года. М.: ЦГКИИПД, 2021. С. 128.

земледелия, роботизации транспорта, важна простота процедуры преобразования между ГИСК и ОЗСК, возможность обойтись без узкоспециализированного геодезического программного обеспечения и дополнительных массивов данных.

Предлагаются следующие критерии оптимальности: универсальность, статичность, практичность, экономичность. Согласно этим критериям, перспективная государственная ГИСК должна:

- максимально удовлетворять запросам всех групп потребителей на всей территории РФ (критерий универсальности);
- гарантировать максимальную неизменность значений координат объектов недвижимости (критерий статичности);
- обеспечивать максимальную простоту процессов определения и преобразования координат в нужную СК для наибольшего количества пользователей с учетом специфики запросов каждой группы (критерий практичности);
- минимизировать затраты на поддержание координатной основы и обеспечение доступа к ней с учетом затрат на развитие необходимой инфраструктуры (критерий экономичности).

Далее изложены теоретическое определение и принцип практической реализации государственной ГИСК, которая соответствует указанным критериям и позволит решить обозначенную проблему.

2 Материалы и методы

Рассмотрим гипотетическую земную систему координат ГСК-2035, по определению отличающуюся от ГСК-2011 следующими положениями:

- координатные оси единой государственной системы координат ГСК-2035 вращаются вместе с Евразийской литосферной плитой относительно осей Международной земной системы отсчета ITRS и совпадают с ними в момент времени 00:00 по UTC 1 января 2035 года;
- система координат ГСК-2035 является статической, т. е. в ней считаются постоянными значения координат всех точек, неподвижных относительно локального участка земной поверхности; при трансформировании значения координат в ГСК-2035 относятся к эпохе 1 января 2035 года.

Способ создания координатной основы ГСК-2035 может быть формализован следующим образом. Каталог координат пунктов государственной геодезической сети и Федеральной сети геодезических станций в системе координат ГСК-2035 вычисляется в результате минимально ограниченного уравнивания геодезической сети под условием равенства нулю семи параметров Гельмерта относительно ITRF2020 с последующим учетом движения пунктов на интервале времени от средней эпохи измерительной кампании до эпохи 2035.0 по формулам

$$\begin{aligned}
 1 \quad & \mathbf{X}_{ГСК2035} = \mathbf{X}_{ITRF2020}(2035.0) = \widehat{\mathbf{X}}_{ITRF2020}(\bar{t}) + \check{\mathbf{V}}(2035.0 - \bar{t}), \\
 2 \quad & \check{\mathbf{V}} = \check{\mathbf{V}}_{EU} + \check{\mathbf{V}}_{grid},
 \end{aligned}$$

где $\mathbf{X}_{ГСК2035}$ — вектор прямоугольных геоцентрических координат $(X \ Y \ Z)^T$ пунктов сети в каталоге ГСК-2035, полученных по результатам уравнивания и прогноза движения;

$\widehat{\mathbf{X}}_{ITRF2020}(\bar{t})$ — вектор оценок прямоугольных геоцентрических координат в ITRF2020, полученный по результатам уравнивания на среднюю эпоху измерительной кампании \bar{t} для каждого пункта;

$\check{\mathbf{V}}$ — вектор скорости, вычисляемый по моделям, являющимся неотъемлемой частью определения ГСК-2035;

$\check{\mathbf{V}}_{EU}$ — вектор скорости точки с координатами $\widehat{\mathbf{X}}_{ITRF2020}$, движущейся вместе с Евразийской плитой согласно модели ITRF2020 PMM [11];

\check{V}_{grid} — вектор остаточной скорости, интерполируемый по регулярной сетке для учета динамических эффектов, включая разность угловых скоростей движения Евразийской литосферной плиты и той плиты, на которой расположен пункт, деформацию земной коры в зоне тектонических разломов, деформацию поверхности вследствие постледниковой отдачи. В качестве примера в прототипе онлайн-сервиса преобразования координат [9] используется билинейно интерполируемая сетка остаточных скоростей с шагом 1° .

Скорость точки литосферной плиты, определяемую по ее угловой скорости согласно модели ITRF2020 PMM [12], можно представить в виде

$$\check{V}_{EU} = \begin{pmatrix} 0 & -\dot{\omega}_z & \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z & 0 & -\dot{\omega}_x \\ -\dot{\omega}_y & \dot{\omega}_x & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{T}_x \\ \dot{T}_y \\ \dot{T}_z \end{pmatrix},$$

где $\dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z$ — угловые скорости вращения Евразийской плиты в радианной мере; $\dot{T}_x, \dot{T}_y, \dot{T}_z$ — скорости линейного движения начала модели ITRF2020 PMM относительно осей ITRF2020.

В таком виде параметры модели движения литосферной плиты образуют линейную комбинацию со скоростями изменения параметров трансформирования, что позволяет встроить учет вращения осей системы вместе с Евразийской плитой в систему параметров Гельмерта относительно ITRF2020. Примеры такого подхода — ETRS89⁸ и GDA2020⁹.

При минимально ограниченном уравнивании сетей на территории отдельных государств, как правило, фиксируются только три параметра сдвига барицентра. Для проверки корректности фиксации нулевых значений всех семи параметров Гельмерта предлагается дополнительно выполнить уравнивание с фиксацией только барицентра сети и затем оценить значимость оценок масштаба и разворота по сравнению со стандартными отклонениями этих оценок. Учитывая, что привязка спутниковой геодезической сети выполняется к ITRF2020, созданной методами космической геодезии, следует ожидать, что масштаб и разворот будут незначимыми. Тогда фиксация всех семи параметров Гельмерта будет корректной. В этом случае параметры связи ГСК-2035 с другими СК через связь с ITRF возможно вычислить еще до уравнивания.

3 Результаты

Результатом установления статической СК является координатная основа, представленная как каталогом координат, так и математической моделью трансформирования. В модели связи ГСК-2035 с другими СК предлагается выделить несколько приближений — уровней сложности и точности преобразований координат. Пользователь может выбирать конкретное, нормативно определенное приближение и использовать соответствующую формулу преобразования в зависимости от требований к точности для конкретной задачи.

Нулевое приближение исключает трансформирование между ГСК-2035 и ОЗСК. Например, для навигации повышенной точности возможно использовать совместно без трансформирования модели местности в ГСК-2035 и координаты в ОЗСК, полученные с помощью ГНСС. При этом постоянные координаты в ГСК-2035 считаются приближенно равными координатам в ITRF2020 на текущую эпоху:

8 Altamimi Z., Collilieux X. EUREF Technical Note 1: Relationship and Transformation between the International and the European Terrestrial Reference Systems. March 4, 2024. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://etrs89.ensg.ign.fr/pub/EUREF-TN-1-Mar-04-2024.pdf> (дата обращения: 28.04.2025).

9 GDA2020. Technical Manual v1.8. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.icsm.gov.au/sites/default/files/GDA2020%20Technical%20Manual%20V1.8_published_0.pdf (дата обращения: 28.04.2025).

$$X_{ГСК2035} \approx X_{ITRF2020}(t).$$

Согласно определению ГСК-2035, с учетом скорости движения Евразийской плиты в 2035 году прямоугольные пространственные координаты в этой системе будут максимально численно близки к текущим координатам в ОЗСК, а на интервале с 2027 по 2042 год упрощение, согласно формуле (4), будет вносить погрешность не более 2 дм по абсолютной величине, что приемлемо во многих случаях для автоматической навигации повышенной точности беспилотных транспортных средств и другой техники. Аналогичное предположение в отношении ГСК-2011 приводило бы на указанном интервале времени к погрешностям от 4 до 8 дм. Поэтому ГСК-2035 является удачным выбором для представления единой картографической основы.

Первое приближение состоит в 14-параметрическом преобразовании Гельмерта между ГСК-2035 и другими СК:

5

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{B'} = (1 + m) \begin{pmatrix} 1 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 1 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_A + \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix},$$

6

$$\begin{cases} \Delta X = \Delta X(t_0) + \Delta \dot{X}(t - t_0), \\ \Delta Y = \Delta Y(t_0) + \Delta \dot{Y}(t - t_0), \\ \Delta Z = \Delta Z(t_0) + \Delta \dot{Z}(t - t_0), \\ m = m(t_0) + \dot{m}(t - t_0), \\ \omega_x = \omega_x(t_0) + \dot{\omega}_x(t - t_0), \\ \omega_y = \omega_y(t_0) + \dot{\omega}_y(t - t_0), \\ \omega_z = \omega_z(t_0) + \dot{\omega}_z(t - t_0), \end{cases}$$

Таблица 1

Параметры Гельмерта и скорости их изменения при преобразовании в ГСК-2035 (система Б) из других СК

Table 1

Helmert parameters and their rates of change when transformed to GSK-2035 (system B) from other reference frames

где $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ — линейные элементы трансформирования (сдвиг начала СК А относительно начала СК Б), м;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ — угловые параметры, рад;

m — масштабный параметр;

t — момент времени (эпоха), на который выполняется трансформирование;

t_0 — момент времени, на который заданы параметры трансформирования (опорная эпоха параметров).

Исходные данные для вычислений приведены в табл. 1.

Исходная система А	$\Delta X(t_0)$, мм	$\Delta Y(t_0)$, мм	$\Delta Z(t_0)$, мм	$m(t_0)$, 10^{-9}	$\omega_x(t_0)$, 10^{-3} угл. с	$\omega_y(t_0)$, 10^{-3} угл. с	$\omega_z(t_0)$, 10^{-3} угл. с	Статическая СК
	$\Delta \dot{X}$, мм/год	$\Delta \dot{Y}$, мм/год	$\Delta \dot{Z}$, мм/год	\dot{m} , 10^{-9} /год	$\dot{\omega}_x$, 10^{-3} "/год	$\dot{\omega}_y$, 10^{-3} "/год	$\dot{\omega}_z$, 10^{-3} "/год	
ГСК-2011	5,68	20,00	6,86	-0,19	1,497	12,395	-18,017	Да
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	
ПЗ-90.11	-3,20	0,00	-5,30	-0,31	0,019	-0,042	0,002	Нет
	-0,37	-0,25	-0,84	-0,03	-0,085	-0,519	0,753	
СК-42	23 562,68	-140 838,00	-79 763,14	-227,59	-0,241	-334,046	-812,280	Да
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	
СК-95	24 462,68	-130 778,00	-81 523,14	-227,59	-0,241	15,954	-152,280	Да
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	
ITRF2020	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	Нет
	-0,37	-0,35	-0,74	0,00	-0,085	-0,519	0,753	
ITRF2014	1,40	2,90	-5,40	0,42	0,000	0,000	0,000	Нет
	-0,37	-0,25	-0,94	0,00	-0,085	-0,519	0,753	
ITRF2008	-0,20	1,00	-5,30	-0,31	0,000	0,000	0,000	Нет
	-0,37	-0,25	-0,84	-0,03	-0,085	-0,519	0,753	

Первое приближение учитывает вращение осей ГСК-2035 вместе с Евразийской плитой. Этого достаточно для обеспечения точности преобразования, соответствующей точности геодезических измерений, в случаях трансформирования:

- из ГСК-2035 в статические СК, такие как ГСК-2011 (2011.0), СК-42, СК-95, местные, условные СК на всей территории России;
- между ГСК-2035 и динамическими СК (ITRF, ETRF, ПЗ-90.11 и др.) в пределах недеформируемой части Евразийской плиты.

Второе приближение в дополнение к первому включает учет остаточных скоростей, интерполируемых по регулярной сетке:

$$7 \quad \mathbf{X}_{B'}(t) = \mathbf{X}_{B'}(t) + \check{\mathbf{V}}_{grid}(t - t_0).$$

Сетка является единой для всей территории России и сопредельных территорий. Для недеформируемой части Евразийской плиты остаточная скорость равна нулю и второе приближение эквивалентно первому.

Третье приближение включает учет полного набора региональных и локальных поправок модели — патчей (*англ.* patch), если они определены для конкретной территории:

$$8 \quad \mathbf{X}_{B''}(t) = \mathbf{X}_{B'}(t) + \Delta \mathbf{X}(t).$$

Каждый патч ограничивается в пространстве и времени, включает необходимый для учета деформации набор регулярных сеток элементов функциональной модели в соответствии со стандартом OGC¹⁰. Вектор поправок $\Delta \mathbf{X}(t)$ вычисляется как сумма поправок по всем сеткам всех патчей для данной территории на момент времени t . Патч может включать сетки постоянных поправок скоростей, нелинейных косейсмических, постсейсмических смещений, амплитуд годовых и полугодовых колебаний и при необходимости другие элементы функциональной модели деформации. Сетки поправок могут вычисляться для отдельных территорий на основе результатов геодезических измерений и нормативно вводиться там, где есть практическая необходимость в повышении точности учета геодинамических эффектов и где работы по созданию таких моделей экономически оправданы. Для территорий, на которых патчи не заданы, значение поправки принимается нулевым, в этом случае третье приближение эквивалентно второму. Каждый патч, введенный в определение ГСК-2035, становится его неотъемлемой частью, после чего фактически создается новая версия координатной основы ГСК-2035, которая должна быть однозначно идентифицирована. Механизм учета деформаций должен быть унифицирован с механизмами версионирования геоинформационных моделей, учитывающих добавление, удаление или изменение геометрии и семантики отдельных объектов.

На данном этапе развития геодезического обеспечения при реализации ГСК-2035 целесообразно ограничиться приближениями с нулевого по второе включительно. Третье приближение поначалу может быть введено номинально, и в отсутствие введенных в определение ГСК-2035 патчей оно не будет сказываться на результатах преобразования.

Для обеспечения прослеживаемости и воспроизводимости результатов преобразования пользователь должен однозначно идентифицировать используемое приближение и версию координатной основы. Наиболее точное приближение следует применять во всех случаях, когда нет уверенности в том, что точности упрощенных формул достаточно для конкретной решаемой задачи.

Далее концепция ГСК-2035 рассмотрена с точки зрения предложенных критериев оптимальности в сравнении с ГСК-2011 и другими альтернативами.

10 Deformation model. Functional model // GitHub, 2022. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://github.com/opengeospatial/CRS-Deformation-Models> (дата обращения: 28.04.2025).

4 Обсуждение

4.1 Универсальность ГСК-2035

Отсутствие стандартного алгоритма учета движения и деформации блоков земной коры в ГСК-2011 приводит к разноточным результатам трансформирования в ОЗСК в различных регионах. На территории европейской части России и в Западной Сибири скорость движения точек возможно определить по одной из моделей движения литосферных плит, например с помощью онлайн-калькулятора GAGE¹¹, поскольку все модели движения литосферных плит включают Евразийскую плиту и вычисленные на ней скорости, как правило, лучше согласуются с результатами определения скоростей пунктов ФАГС, чем для других плит. Для Дальнего Востока проблема точного и однозначного определения скоростей стоит более остро, поскольку в различных моделях на этой территории выделяется разное количество плит, скорости которых разнятся сильнее в зависимости от выбора модели. При этом применение моделей, в которых плиты представлены твердыми участками сферы, приводит к увеличению погрешностей преобразований в зонах деформации. Таким образом, приемлемая точность координатных преобразований в ГСК-2011 технически могла быть обеспечена только для части территории страны.

Новая система ГСК-2035 позволит обеспечить равный доступ к высокоточным преобразованиям координат на всей территории страны для всех групп потребителей. Это происходит за счет замены реального нерегулярного и для большей части территории неизвестного поля скоростей точек местности на модельное, являющееся частью определения ГСК-2035, в каждой точке которого значение скорости вычисляется строго по известным формулам. Данный подход уже давно зарекомендовал себя в геодезии: в отечественной практике в более широком смысле — при установлении нормальной системы высот (аналогично вместо геоида, определение которого проблематично, вводится строго вычисляемая поверхность — квазигеоид), а за рубежом и применительно к СК, например NZGD2000 [13].

4.2 Статичность ГСК-2035

В отличие от ОЗСК, являющихся динамическими по умолчанию, ГИСК могут быть как статическими, так и динамическими. Пример динамической СК, зафиксированной на литосферной плите для минимизации, но не полного исключения остаточных скоростей, — ETRS89/ETRF. Примеры национальных статических ГИСК — GDA2020, NZGD2020.

Возникает вопрос о том, какой способ реализации лучше соответствует назначению ГИСК. В отечественной геодезической практике, по-видимому под влиянием примера ITRS/ITRF, устоялось представление о динамической СК как о более совершенной в сравнении со статической. В динамической ГИСК сохраняется возможность более точного определения координат одних точек в сопоставлении с другими, что теоретически может быть полезно, если ГИС позволяют хранить и обрабатывать информацию о точности координат отдельных точек, например в виде их ковариационной матрицы. Однако реализация этого подхода на практике была бы крайне сложна как в части нормативно-технического регулирования, так и с точки зрения программной реализации, а выгоды были бы неочевидными. При этом возникнет та же ситуация, которая сложилась в ходе внедрения ГСК-2011, когда для одних точек (пунктов ФАГС)

¹¹ GAGE Plate Motion Calculator. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html> (дата обращения: 28.04.2025).

скорости были определены, а для всех остальных — нет. В этом случае избирательный учет скоростей, очевидно, приводил бы к рассогласованию геопространственных данных. Закономерным итогом стал отказ от учета скоростей и переосмысление ГСК-2011 как статической СК. Для СК, в которой остаточные скорости будут на порядок меньше, чем в ГСК-2011, выбор в пользу статичности должен быть еще более очевидным и неизбежным.

ГСК-2035 явно определена как статическая СК. Это позволяет избежать неоднозначности в отношении необходимости включения в структуру баз геопространственных данных полей эпохи и параметров моделей движения отдельных точек. Все динамические эффекты учитываются при трансформировании между ГСК-2035 и ОЗСК, что будет максимально упрощать работу с геопространственными данными, представленными в ГСК-2035.

4.3 Практичность ГСК-2035

Удобство и простота процедур преобразования являются залогом их безошибочного практического применения. Практичность обеспечивается за счет адаптируемого уровня сложности преобразований в зависимости от требуемой точности, а также за счет полной автоматизации строгой процедуры.

В рамках нулевого приближения прямоугольные координаты в ГСК-2035 полагаются эквивалентными координатам в ITRF2020, что позволяет использовать результаты спутникового позиционирования в ОЗСК и картографическую подложку в ГСК-2035 совместно без преобразований, внося таким образом погрешность от 0 до 2 дм для территории России на длительном интервале времени. Высокоточные преобразования координат для территорий, не испытывающих значительной деформации, на которых в РФ, согласно приближенной оценке¹², сосредоточено более $\frac{3}{4}$ спроса на высокоточную геопространственную информацию, преобразование выполняется по модели Гельмерта без дополнительных поправок.

На остальной части территории РФ при высокоточных преобразованиях координат необходимо учитывать нерегулярные деформации, что требует изменения принятого в России подхода к стандартизации и разработки нового поколения онлайн-сервисов и программного обеспечения с открытым исходным кодом. Новый подход реализован при создании прототипа общедоступного онлайн-сервиса преобразования координат¹³, представленного в работе [9]. В настоящее время онлайн-сервис поддерживает ГСК-2035, что позволяет обеспечить полную автоматизацию процедуры координатных преобразований.

4.4 Экономичность ГСК-2035

Во-первых, способ реализации ГСК-2035 предполагает возможность быстрого введения этой СК без значительных предварительных затрат на создание сплошной геодинамической сети вдоль границ литосферных плит на территории РФ, что предполагалось в работе [5].

Во-вторых, введение государственной ГИСК с характеристиками ГСК-2035 является необходимым условием создания системы высокоточного координатного обеспечения, на порядок более эффективной, чем имеющаяся. ГСК-2035 сформулирована таким образом, чтобы обеспечивать максимально простую и высокоточную связь с ОЗСК на текущую эпоху, используемую в ГНСС. Это является ключевым условием повышения на 1–2 порядка эффективности

12 Lipatnikov L. Preliminary Study on 3D Reference Frames for the Russian Federation // FIG Working Week 2019. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2019/ppt/rfp/09_rfp_2019_Lipatnikov.pdf (дата обращения: 28.04.2025).

13 Сервис преобразования координат. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://service.geocentric.kuz> (дата обращения: 28.04.2025).

высокоточного координатного обеспечения в России, наряду с внедрением информационной системы Федеральной сети геодезических станций и технологий позиционирования на основе метода Precise Point Positioning [9].

5 Выводы

Переопределение государственной СК, применяемой для решения задач геодезии и картографии, является необходимым условием стабильной реализации эффективного высокоточного координатного обеспечения на территории России на интервале, составляющем десятки лет. Для этого предложено теоретическое определение и способ практической реализации новой системы координат ГСК-2035, оптимальной с точки зрения сформулированных критериев универсальности, статичности, практичности и экономичности, в соответствии с которыми она должна обеспечивать:

- доступность высокоточной координатной основы для всех групп пользователей на всей территории Российской Федерации;
- постоянство координат объектов недвижимости для использования в реестрах, ГИС, САПР и т. д.;
- оптимизацию сложности преобразований в зависимости от требуемой точности, а также полную автоматизацию строгих координатных преобразований с использованием онлайн-сервиса¹⁴ [9];
- быстрое и экономичное внедрение, не требующее предварительного создания сплошных сетей мониторинга вдоль границ блоков земной коры и иной дорогостоящей инфраструктуры.

Внедрение государственной СК с представленными характеристиками является необходимым условием реализации единого высокоточного геоинформационного пространства и соответствующего по точности навигационного поля на всей территории России, что повысит эффективность высокоточного координатного обеспечения в стране на один-два порядка.

БЛАГОДАРНОСТИ Исследование выполнено в рамках НИР «ГЕОТЕХ-Квант» по заказу ППК «Роскадастр».

- БИБЛИОГРАФИЯ**
1. Урличич Ю.М., Финкельштейн А.М., Ревнивых С.Г. и др. Архитектура перспективной системы координатно-временного и навигационного обеспечения России // Труды ИПА РАН. 2009. № 20. С. 20–32.
 2. Горобец В.П., Ефимов Г.Н., Столяров И.А. Опыт Российской Федерации по установлению государственной системы координат 2011 года // Вестник СГУГиТ. 2015. № 2(30). С. 24–37.
 3. Савиных В.П., Быков В.Г., Карпик А.П. и др. Организация Международной комиссии по региональной земной геодезической основе Северо-Восточной Евразии // Науки о Земле. 2014. № 1-2. С. 16–25.
 4. Дорогова И.Е. Разработка программно-математической модели движений земной коры для территории Российской Федерации // Геодезия и картография. 2024. № 7. С. 2–11. DOI:10.22389/0016-7126-2024-1009-7-2-1.
 5. Бовшин Н.А. Оптимизация условий применения системы ГСК-2011 в Дальневосточном регионе // Геодезия и картография. 2019. № 9. С. 2–9. DOI:10.22389/0016-7126-2019-951-9-2-9.
 6. Вдовин В.С., Дворкин В.В., Карпик А.П. и др. Проблемы и перспективы развития активных спутниковых геодезических сетей в России и их интеграции в ITRF // Вестник СГУГиТ. 2018. Т. 23, № 1. С. 6–27.

¹⁴ Сервис преобразования координат. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://service.geocentric.ru/> (дата обращения: 28.04.2025).

7. Обиденко В.И. Единое высокоточное гомогенное координатное пространство территорий и местные системы координат: пути гармонизации // Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25, № 2. С. 46–62. DOI:10.33764/2411-1759-2020-25-2-46-62.
8. Карпик А.П., Дорогова И.Е. Анализ мирового опыта ввода полудинамических систем координат и территориальных реализаций систем координат // Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 4. С. 16–30. DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-4-16-30.
9. Липатников Л.А. Онлайн-сервис преобразования координат // Геодезия и картография. 2025. № 3. С. 2–12. DOI:10.22389/0016-7126-2025-1017-3-2-12.
10. Бовшин Н.А. Высокоточные координатные GNSS-определения в системе ГСК-2011 // Геодезия и картография. 2019. № 2. С. 2–14. DOI:10.22389/0016-7126-2019-944-2-2-14.
11. Altamimi Z., Rebischung P., Collilieux X., et al. ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions // Journal of Geodesy. 2023. Vol. 97. No. 5. P. 47. DOI:10.1007/s00190-023-01738-w.
12. Altamimi Z., Métivier L., Rebischung P., et al. ITRF2020 Plate Motion Model // Geophysical Research Letters. 2023. Vol. 50. No. 24. P. e2023GL106373. DOI:10.1029/2023GL106373.
13. Blick G., Grant D. The implementation of a semi-dynamic datum in New Zealand – ten years on // Proceedings of the XXIV FIG International Congress 2010. Sydney, 11–16 April 2010. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2010/papers/ts01c/ts01c_blick_grant_3975.pdf (дата обращения: 28.04.2025).

АВТОР **Липатников Леонид Алексеевич**

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ), Новосибирск, Россия
кафедра космической и физической геодезии, Институт геодезии и менеджмента
канд. техн. наук
 0000-0002-5082-4062

Поступила 01.05.2025. Принята к публикации 24.10.2025. Опубликовано 31.10.2025.



On Accounting for Dynamic Effects in Establishing the State Coordinate System: A Case Study of the GSK-2035 Prototype

Leonid A. Lipatnikov¹

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
 lipatnikov_l@mail.ru

CITATION Lipatnikov LA. On Accounting for Dynamic Effects in Establishing the State Coordinate System: A Case Study of the GSK-2035 Prototype. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(5): 8–21. DOI:10.30533/GiA-2025-043.

KEYWORDS national datum, reference frame, transformation, deformation, tectonic plate motion

ABSTRACT The article is devoted to overcoming the decimeter-level limit of positioning accuracy, resulting from inconsistency between the purpose of the national datum GSK-2011 and its underlying theoretical definition. The criteria for the optimal definition of the national datum are formulated in respect to the most cost-effective satisfying of user needs at a time interval of more than 20 years. A definition and a method of implementation of datum prototype, designated GSK-2035, are presented. GSK-2035 enables accounting for the physical deformation of the territory, while ensuring the constancy of the coordinates of real estate objects, unambiguous transformation to ITRF at a sub-centimeter accuracy level for the entire territory of Russia with maximum simplicity of transformations. The cartesian coordinates in GSK-2035 and ITRF2020 will be numerically close within 15 years after the introduction of the proposed datum, which makes it optimal for creating a unified cartographic layer and allows it to be used for GNSS navigation with relatively high accuracy even without transformation. In order to achieve the highest accuracy of transformations in GSK-2035, in nearly three quarters of cases in the territory of the Russian Federation, the standard Helmert model with parameters' rates is sufficient. In other cases, high accuracy is achieved by applying a constant velocity field and local corrections, which are an integral part of GSK-2035. The transformations are fully automated. The introduction of a reference frame with the presented characteristics is a prerequisite for the implementation of a unified high-precision geo-information space and a navigation field of the corresponding accuracy throughout the territory of Russia. That would also provide increase in the efficiency of high-precision positioning by one or two orders of magnitude comparing to current procedures of accessing the national datum.

ACKNOWLEDGEMENTS The research was carried out within the framework of the GEOTECH-Kvant research project commissioned by the Roskadastr Public Law Company.

- REFERENCES**
1. Urlichich YuM, Finkel'shtein AM, Revnivykh SG, et al. Arkhitektura perspektivnoi sistemy koordinatno-vremennogo i navigatsionnogo obespecheniya Rossii [The architecture of prospective PNT-System of Russia]. *Transactions of IAA RAS*. 2009;20: 20–32. (In Russian).
 2. Gorobets VP, Efimov GN, Stolyarov IA. Opyt Rossiiskoi Federatsii po ustanovleniyu gosudarstvennoi sistemy koordinat 2011 goda [Experience of Russian Federation in establishment of national coordinate system 2011]. *Vestnik SSUGT*. 2015;2(30): 24–37. (In Russian).
 3. Savinykh VP, Bykov VG, Karpik AP, et al. Organizatsiya Mezhdunarodnoi komissii po regional'noi zemnoi geodezicheskoi osnove Severo-Vostochnoi Evrazii [Organization of the North East Eurasia reference frame]. *Geo Science*. 2014;1-2: 16–25. (In Russian).
 4. Dorogova IE. Razrabotka programmno-matematicheskoi modeli dvizhenii zemnoi kory dlya territorii Rossiiskoi Federatsii [Developing a software and the Earth's crust movements' mathematical model for the Russian Federation's territory]. *Geodesy and Cartography*. 2024;7: 2–11. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2024-1009-7-2-1.
 5. Bovshin NA. Optimizatsiya uslovii primeneniya sistemy GSK-2011 v Dal'nevostochnom regione [On perfecting the employment of GSK-2011 reference frame in the Far East territory]. *Geodesy and Cartography*. 2019;9: 2–9. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2019-951-9-2-9.
 6. Vdovin VS, Dvorkin VV, Karpik AP, et al. Problemy i perspektivy razvitiya aktivnykh sputnikovykh geodezicheskikh setei v Rossii i ikh integratsii v ITRF [Current state and future development of active satellite geodetic networks in Russia and their integration into ITRF]. *Vestnik SSUGT*. 2018;23(1): 6–27. (In Russian).
 7. Obidenko VI. Edinoe vysokotochnoe gomogennoe koordinatnoe prostranstvo territorii i mestnye sistemy koordinat: puti garmonizatsii [A single high-precision homogeneous coordinate space of territories and local coordinate systems: ways of harmonization]. *Vestnik SSUGT*. 2020;25(2): 46–62. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2020-25-2-46-62.
 8. Karpik AP, Dorogova IE. Analiz mirovogo opyta vvoda poludinamicheskikh sistem koordinat i territorial'nykh realizatsii sistem koordinat [Analysis of world experience in introducing semi-dynamic coordinate systems and territorial implementations of coordinate systems]. *Vestnik SSUGT*. 2024;29(4): 16–30. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-4-16-30.
 9. Lipatnikov LA. Onlain-servis preobrazovaniya koordinat [Web service for coordinate operations]. *Geodesy and Cartography*. 2025;3: 2–12. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2025-1017-3-2-12.
 10. Bovshin NA. Vysokotochnye koordinatnye GNSS-opredeleniya v sisteme GSK-2011 [High-precision GNSS-positioning in GSK-2011 reference frame]. *Geodesy and Cartography*. 2019;2: 2–14. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2019-944-2-2-14.
 11. Altamimi Z, Rebischung P, Collilieux X, et al. ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions. *Journal of Geodesy*. 2023;97(5): 47. DOI:10.1007/s00190-023-01738-w.
 12. Altamimi Z, Métivier L, Rebischung P, et al. ITRF2020 Plate Motion Model. *Geophysical Research Letters*. 2023;50(24): e2023GL106373. DOI:10.1029/2023GL106373.
 13. Blick G, Grant D. The implementation of a semi-dynamic datum in New Zealand – ten years on. *Proceedings of the XXIV FIG International Congress 2010. Sydney, 11–16 April 2010*. Available from: https://fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2010/papers/ts01c/ts01c_blick_grant_3975.pdf (Accessed 28 April 2025).

AUTHOR Leonid A. Lipatnikov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russia
Department of Space and Physical Geodesy, Institute of Geodesy and Management
PhD in Engineering

 0000-0002-5082-4062

Submitted: May 01, 2025. Accepted: October 24, 2025. Published: October 31, 2025.