

Paris, le 14 Juin 2019

Christian Bizouard
Observatoire de Paris / SYRTE
Service International de la Rotation de la Terre et des Systemes de Réference (IERS)
61, avenue de l'Observatoire 75014 Paris FRANCE
tel. : 00 33 1 40 51 23 35
christian.bizouard@obspm.fr
<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc>

Institut Astronomique Sternberg de
l'Université d'Etat de Moscou

A l'attention du jury de Léonid Valantinovich Zotov pour l'obtention du grade de « Docteur-es-Science » de l'Université d'Etat de Moscou

Chers Collègues,

Consultant scientifique de la thèse de Léonid Valantinovitch Zotov, intitulée « Etude des relations entre rotation de la Terre et processus géophysiques », j'aimerais en souligner les qualités et mettre en exergue les principaux résultats. La toile de fond, qui se dégage au fil des chapitres, c'est la recherche systématique, et le cas échéant la détection, de tendances et de régularités dans les variations de la rotation de la Terre à la lumière de leurs causes. A cet effet, L. Zotov développe une méthodologie consistant à identifier des signaux cohérents dans les irrégularités de la rotation terrestre et l'ensemble des processus géophysiques sous-jacents. L. Zotov fait usage de techniques de filtrage numérique sophistiquées (dont la décomposition en composante singulière multicanale ou MSSA) avec une grande maîtrise.

1. Pour déceler la trace de processus géophysiques sur la rotation terrestre, il faut disposer d'un modèle dynamique de la rotation terrestre intégrant précisément la structure interne et la rhéologie terrestre, et permettant ainsi d'évaluer au mieux l'impact de ces processus sur les paramètres de rotation de la Terre. C'est pourquoi, dans le cadre d'une collaboration avec l'Observatoire de Paris, Léonid V. Zotov a entrepris de perfectionner la modélisation dynamique de la rotation terrestre en introduisant l'asymétrie produite par la triaxialité et la marée du pôle océanique. Puis, au moyen d'un filtrage de Panteleev amélioré L. Zotov a recherché la présence des effets asymétriques dans la bande spectrale de Chandler, lesquels se manifestent par une composante circulaire rétrograde de l'ordre de 1 mas, dans le sens opposé au terme de Chandler.
2. Après avoir présenté les améliorations portées à la modélisation dynamique, L. Zotov approfondit et récapitule l'analyse commune qui met en rapport les variations de la rotation terrestre avec les redistributions de masse reflétées par les moments cinétiques des couches fluides et les coefficients de degré 1 et 2 du champ de gravité obtenu par satellites.

Restreignant d'abord son analyse au moment cinétique hydro-atmosphérique, qui permet de décrire la plupart des irrégularités de la rotation terrestre aux périodes infra-

décennales, L. Zotov a élargi ses études aux tendances multi-décennales. En raison des imperfections de la modélisation de la circulation hydro-atmosphérique aux périodes supérieures à 10 ans, L. Zotov inclut dans son traitement les résultats de GRACE, donnant le terme de masse de l'excitation géophysique, et l'ensemble des indices climatiques comme la température globale de surface, le niveau des mers, l'indice nord atlantique (NOAI), etc, Les indices climatiques manifestent des tendances encore mal saisies par les modèles de circulation, et permettent ainsi une démarche heuristique dans l'explication des causes du mouvement du pôle et des variations de la durée du jour aux périodes multi-décennales. Pour isoler les tendances dans l'ensemble de ces quantités et de manière cohérente, Zotov a appliqué la méthode de décomposition en composante singulière multicanale (MSSA) ; dans les composantes de vents et de pression il a pu séparer la variabilité associée au phénomène El-Nino. L'analyse du terme de masse de l'excitation géophysique obtenu par la mission satellitaire GRACE et SLR lui a permis de conclure que le coefficient J_2 augmente fortement depuis 2005 après l'interruption de sa diminution progressive (due au rebond post-glaciaire) vers 1998. A l'aide des mêmes données, il a aussi confirmé le changement de direction de la dérive du pôle advenu en 2003-2005 en raison des changements de masse survenus dans les calottes glaciaires.

L. Zotov aborde, le cas échéant, les variations locales de ces quantités (champ de gravité, moment cinétique, niveau des mers). C'est ainsi qu'il a dressé les cartes d'anomalies de masse sur les bassins hydrologiques de Russie de 2003 à 2017. On ne peut être qu'impressionné par la diversité et le volume des données traitées.

A l'autre extrémité du spectre du mouvement du pôle, rapportée au repère terrestre, se trouve la bande rétrograde diurne. Dans un repère non-tournant cette bande se traduit par des oscillations du moment cinétique atmosphérique dans le plan équatorial avec des périodes supérieures à deux jours, perturbant la précession-nutation de l'axe rotation. Leonid Zotov et ses collaborateurs, y compris les consultants du rapport de thèse, y ont isolé un effet à 13.7 et 7 jours dont ils ont démontré l'origine gravitationnelle lunaire et non thermique.

3. Une contribution remarquable concerne l'excitation du terme de Chandler. A peine dépassant le bruit de fond de l'excitation géophysique, il est ardu de la déterminer avec précision. Reprenant ce problème en 2012, L. Zotov a filtré l'excitation de Chandler avec toutes les précautions nécessaires et mis en évidence une modulation en amplitude avec la périodicité de 20 ans environ. Beaucoup accueillirent ce résultat avec scepticisme. Cependant, Léonid Zotov prouve que cette variabilité observée s'avère bien réelle et non pas un artefact numérique, d'autant plus qu'elle explique pourquoi l'oscillation de Chandler est modulée avec une périodicité de 40 ans. Cette étude conduit à un modèle prédictif du terme de Chandler. S'il s'avérait pertinent à l'avenir, il permettrait d'améliorer la prédiction des paramètres de rotation de la Terre.
4. Ce problème de prédiction, qui est crucial en géodésie spatiale, est aussi un objet important de la recherche de L. Zotov. En mettant en oeuvre différents algorithmes de prédiction (modèles harmonique et autogressif, réseaux de neurone, méthodes des moindres carrés colocalisés) dans le cadre d'une collaboration entre l'Observatoire de Shanghai et l'institut astronomique Sternberg, il a démontré que c'est la combinaison

de ces méthodes qui permet d'obtenir une prédiction dont l'erreur est comparable à celle affectant les prédictions officielles de l'IERS faites à l'US Naval Observatory.

Les résultats obtenus non seulement précisent les contributions régionales des océans et de l'atmosphère sur le mouvement du pôle et la vitesse de rotation, mais mettent en évidence que certains changements globaux contemporains (à l'échelle d'un siècle au plus) se reflètent dans la rotation terrestre.

Sans nul doute, L. Zotov a démontré l'intérêt de la rotation de la Terre pour l'étude de la circulation hydro-atmosphérique aux échelles de temps multi-décennales, semant ainsi les graines pour de nouveaux développements. En effet, l'exposé foisonnant de l'auteur n'épuise pas toutes les conclusions qu'on pourrait tirer des cartes, des animations ou des graphiques. A l'aune d'une approche novatrice et de résultats originaux, je recommande vivement au conseil de l'Université de Moscou 01.02 d'autoriser la soutenance de la thèse de Léonid Zotov et de lui accorder le grade de Docteur-es-Science dans la spécialité 01.03.01 « Astrométrie et Mécanique céleste ».

Christian Bizouard

Astronome, docteur en « Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste en Géodésie », habilité à diriger des recherches, directeur du Centre des Paramètres du Service International de la Rotation de la Terre et des Systèmes de Référence (IERS)

Париж 14 июня 2019 г

Кристиан Бизуар
Парижская обсерватория / SYRTE
Международная служба вращения Земли и систем отсчета (МСВЗ)
61, авеню Обсерватории 75014 Париж Франция
тел. : 00 33 1 40 51 23 35
christian.bizouard@obspm.fr
<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc>

В Государственный астрономический
институт им. П.К. Штернберга МГУ имени
М.В. Ломоносова

Отзыв на диссертацию Леонида Валентиновича Зотова “Исследование связей между вращением Земли и геофизическими процессами”.

Уважаемые коллеги!

Как научный консультант диссертации Леонида Валентиновича Зотова “Исследование связей между вращением Земли и геофизическими процессами” я хотел бы охарактеризовать ее и выделить основные результаты:

Представленная работа, содержащая около десяти глав, является систематическим исследованием, посвященным обнаружению тенденций и закономерностей в вариациях вращения Земли и освещению их причин. Л. Зотов разработал методологию выявления когерентных сигналов в неравномерностях вращения Земли и ансамбле основных геофизических процессов. Он с большим мастерством использует тонкие методы цифровой фильтрации (в том числе многоканальный сингулярный спектральный анализ).

- 1) Чтобы обнаружить влияние геофизических процессов на вращение Земли, необходимо иметь динамическую модель вращения Земли, которая с высокой точностью воспроизводит внутреннюю структуру планеты и её реологию. Только качественная модель позволяет верно оценить влияние этих процессов на параметры вращения Земли. Вот почему Леонид В. Зотов взял на себя труд усовершенствовать динамическое моделирование вращения Земли, вводя в рассмотрение асимметрию, создаваемую трехосностью и океаническим приливом. Затем, используя усовершенствованный фильтр Пантелеева, он провел поиск асимметрических эффектов в чандлеровской спектральной полосе, которые имеют величину порядка 1 миллисекунды дуги и появляются в ретроградной круговой моде на обратной чандлеровской частоте.
- 2) Сделав улучшения динамической модели, Л. Зотов углубляется в совместный анализ изменений во вращении Земли под действием перераспределения масс, исследует угловые (кинетические) моменты подвижных оболочек Земли и коэффициенты гравитационного поля первой и второй степеней по спутниковым данным.

Ограничиваясь на первом этапе исследованием кинетического момента атмосферы и гидросферы, который позволяет объяснить большую часть

внутридекадных (менее 10 лет) вариаций во вращении Земли, Л.В. Зотов расширяет свой анализ на междекадные периоды. Поскольку моделирование гидроатмосферной циркуляции на периодах более 10 лет несовершенно, Л. Зотов привлекает также обработанные им данные GRACE, дающие массовую компоненту геофизического возбуждения и включает в рассмотрение ансамбль климатических индексов, таких как глобальная температура, изменения уровня моря, индекс Североатлантического колебания и др. Тенденции в них, все еще трудно воспроизводятся моделями глобальной циркуляции, но допускают ряд эвристических объяснений причин некоторых особенностей в движении полюса и изменениях длительности суток на мульти-декадных интервалах. Для того, чтобы связанным образом выделить тенденции в этих величинах, Л. Зотов применил многоканальный сингулярный спектральный анализ (МССА) и выделил в компонентах углового момента ветра и давления изменчивость, связанную с Эль-Ниньо Южным колебанием.

Анализ компоненты массы геофизического возбуждения, полученного со спутников GRACE, а также по данным лазерной локации спутников ЛЛС, позволил автору сделать вывод о том, что коэффициент J_2 , уменьшавшийся до этого из-за послеледникового поднятия, стал быстро увеличиваться с 2005 года. Используя те же данные, он подтвердил, что изменение направления дрейфа полюса в 2003-2005 годах вызвано изменениями масс в ледяных щитах.

Л. Зотов обсуждает, в зависимости от обстоятельств, локальные вариации геофизических величин (гравитационного поля, кинетического момента, уровня моря). В частности, им получены карты аномалий масс в бассейнах российских рек по данным с 2003 по 2017 год. Можно только удивиться разнообразию и объему обработанных данных.

На противоположном относительно движения полюса конце спектра, в системе, заданной земным репером, находится суточная ретроградная полоса частот. В невращающейся (небесной) системе отсчета в этой полосе происходят колебания атмосферного кинетического момента в экваториальной плоскости с периодами, превышающими два дня, которые влияют на прецессию и нутацию оси вращения Земли. Леонид Зотов и его коллеги, включая консультантов диссертации, выделили эффект на периодах 13.7 и 7 суток, и продемонстрировали их лунное приливное происхождение.

- 3) Замечательный вклад в движение полюса вносит Чандлеровское колебание. Его геофизическое возбуждение, едва превышающее фоновый шум, весьма трудно для определения. Занявшись этой проблемой в 2012 году, Л. Зотов отфильтровал возбуждение Чандлера со всеми необходимыми мерами предосторожности и выделил модуляции амплитуды с периодом около 20 лет. По началу многие восприняли этот результат со скептицизмом. Однако Л. Зотов доказал, что эту наблюдаемую изменчивость следует считать совершенно реальной, объясняющей 40-летнюю модуляцию чандлеровского колебания, а вовсе не

численным артефактом. Выполненное исследование позволяет создать предсказательную модель для Чандлеровской компоненты. Если она оправдается в будущем, то точность прогнозирования параметров вращения Земли улучшится.

- 4) Проблема прогнозирования, являющаяся ключевой в пространственной геодезии, также выступает предметом исследования Л. Зотова. Используя различные алгоритмы прогнозирования (гармонические и авторегрессионные модели, нейронные сети, среднюю квадратическую коллокацию), в рамках сотрудничества между Шанхайской обсерваторией и Астрономическим институтом им. П.К. Штернберга, он продемонстрировал, что комбинированный прогноз даёт ошибку сравнимую с ошибкой официальных прогнозов МСВЗ, выполняемых Военно-морской обсерваторией США.

Полученные результаты не только определяют региональный вклад океанов и атмосферы в движение полюса и скорость вращения Земли, но и подчеркивают, что некоторые современные глобальные изменения (на масштабе столетия и более) отражаются на вращении Земли. Без сомнения, Л. Зотовым показано, какое большое значение вращение Земли может иметь для изучения гидроатмосферной циркуляции на временных масштабах в десятки лет, им заложены основы для новых исследований. Обширное изложение автора не исчерпывает всех выводов, которые можно сделать из полученных им карт, анимаций, формул и графиков.

Диссертация может быть рекомендована к защите. В свете новаторского подхода и оригинальных результатов я также призываю диссертационный совет МГУ.01.02 присудить Л.В. Зотову звание доктора наук по специальности 01.03.01 – астрометрия и небесная механика.

Кристиан Бизуар

Астроном, доктор Фундаментальной астрономии, небесной механики и геодезии, уполномоченный исследователь, директор Центра параметров вращения Земли Международной службы вращения Земли и систем отсчета (МСВЗ)