

## **Направление 3. Луна и планеты земной группы, сравнительная планетология**

**Координаторы: А.Т. Базилевский Б.А. (ГЕОХИ), Иванов Б.А.(ИДГ)**

### **Проект 3.1: Геохимико-геофизические модели состава, внутреннего строения и химической дифференциации Луны**

**Научный рук. зав. лаб. ГЕОХИ РАН, чл-корр. РАН О. Л. Кусков**

На основе обращения гравитационных (масса, момент инерции), сейсмических (скорости продольных и поперечных волн) и петрологических (балансовые соотношения) данных методом Монте-Карло проведена реконструкция химического состава зональной мантии Луны. Расчеты фазового состава и физических свойств мантии осуществлены с помощью метода минимизации свободной энергии Гиббса и уравнений состояния мантийного вещества. Рассмотрены модели Луны с различной степенью ограничений на искомое решение. Получены геофизически и геохимически допустимые интервалы концентраций в трех зонах мантии. Мантия Луны стратифицирована по химическому составу с разными концентрациями породообразующих оксидов в различных зонах мантии. Ортопироксен является доминирующей фазой верхней мантии. В зависимости от концентрации  $Al_2O_3$  в коре и ее мощности силикатная фракция (кора + мантия) Луны может содержать до 5-6%  $Al_2O_3$  и 10-13% FeO. Проведено моделирование расположения сейсмических (обусловленных разным химическим составом) границ в мантии с учетом ограничений на массу и момент инерции. Химическая границы средняя – нижняя мантия, вероятно, существует и может быть расположена на глубинах 600-750 км. Расчеты показывают, что возможны модели верхней мантии как с химической границей на глубине 250-300 км, так и без нее. Проведены оценки основных физико-химических параметров мантии Луны. Основной результат: на основе совместной оптимизации гравитационных, сейсмических и петрологических данных получены оценки геофизически допустимых концентраций породообразующих оксидов в различных зонах мантии.

#### **Публикации по проекту за 2012 г.:**

*Кронрод В.А.* Тепловой режим и состав Луны. Труды VIII Межд. школы по наукам о Земле, Одесса, 2012, с.66-71.

*Кронрод Е.В., Кусков О.Л., Кронрод В.А.* Анализ сейсмических профилей в Луне методами термодинамического моделирования. Труды VIII Межд. школы по наукам о Земле, Одесса, 2012, с.62-66.

*Кронрод В.А., Кусков О.Л., Кронрод Е.В.* Тепловой режим Луны и геохимические следствия. Vestn. ONZ, 4, NZ9001, doi:10.2205/2012NZ000111, 2012.

#### **Доклады на конференциях**

*Кронрод Е.В., Кусков О.Л., Кронрод В.А* Вероятный профиль температуры в мантии Луны. XIII межд. Конф. Физ-хим. петрофиз. исследования в науках о Земле, Москва-Борок, 2012.

*Kronrod E.V., O.L. Kuskov, Kronrod V.A.* Thermodynamic modeling of the analysis of lunar seismic and temperature profiles. III Moscow International Solar System Symposium, IKI, 2012.

*Kronrod E.V., O.L. Kuskov, Kronrod V.A.* The analysis of seismic profiles of the Moon by thermodynamic modeling. European Planetary Science Congress 2012, Madrid, Spain

*Kronrod V.A., Kuskov O.L.* The lunar heat flow and the bulk composition. European Planetary Science Congress 2012, Madrid, Spain

*Kuskov O.L., V.A. Kronrod, Kronrod E.V.* Joint inversion of seismic and petrologic models for the thermal state of the Moon. European Planetary Science Congress 2012, Madrid, Spain.

### **Проект 3.2. Изучение пространственной картины сезонного накопления льда воды в поверхностном грунте Марса и выяснение его абсолютного содержания при современных климатических условиях планеты.**

**Научный рук. вед. научн. сотр. Р.О. Кузьмин**

За период с 01 февраля по 31 октября 2012 г. в рамках данного проекта были получены следующие результаты:

1. По данным сравнения результатов картирования спектрометром ТЭС тепловой инерции марсианского грунта в летний, зимний и весенний сезоны проведены оценки и картирование содержания льда воды (в объёмных %) в поверхностном грунте Марса (толщиной 2-10 см) на перифирии отступающей северной сезонной полярной шапки в разные стадии её весенней регрессии. Картирование проведено как по данным многолетних наблюдений ТЭС, так и по данным каждого года наблюдений;

2. По осредненным многолетним измерениям нейтронного альбедо Марса нейтронным детектором ХЕНД величины измеренных потоков нейтронов высоких энергий (2.5-10 Мев) (по 40-дневным временным интервалам) были конвертированы в значения содержания эквивалента воды (в массовых %) в слое марсианского грунта, соответствующего слою генерации этих нейтронов (мощностью до 20 см). По этим данным для разных сезонов выполнено картирование пространственных вариаций значений содержания эквивалента воды в слое поверхностного грунта;

3. На основе данных спектральной съёмки поверхности Марса картирующим спектрометром ОМЕГА с борта КА «Марс-Экспресс» осуществлено картирование пространственных вариаций величин спектрального индекса льда воды на поверхности северной сезонной полярной для разных стадий её весенней регрессии отдельно по каждому году наблюдений спектрометра. Визуализация полученных результатов для указанных разделов темы приведена как в виде карт пространственных вариаций

распространения содержаний льда воды и водного эквивалента в поверхностном слое марсианского грунта, так и в форме зонально осредненных меридиональных профилей.

#### **Публикации по проекту за 2012 г.:**

*Kuzmin R.O., Zabalueva E.V., Evdokimova N.A., and Christensen P.R.* (2012), Mapping of the water ice content within the Martian surficial soil on the periphery of the retreating seasonal northern polar cap based on the TES and the OMEGA data, *J. Geophys. Res.*, 117, EXXXXX, doi:10.1029/2012JE004071.

*Kuzmin R.O., Zabalueva E.V., Litvak M.L., Mitrofanov I.G.* (2012). Particularities of the inter-years and seasonal variations of the water equivalent content within the surficial soil layer on Mars revealed based on the data analysis of the HEND instrument observations. *European Planetary Congress*, 23-28 September 2012, Madrid, Spain, Abstract EPSC2012-859.

*Kuzmin R.O., Zabalueva E.V., Evdokimova N.A., Litvak M.L., Mitrofanov I.G. and Christensen P.R.* (2012), Seasonal and inter-years variations of the water content within the surficial layer of the Martian soil revealed based on the TES, the OMEGA and the HEND data analysis. *The third Moscow Solar System Symposium (3M-S<sup>3</sup>)*, 8-11 October 2012, IKI RAS, Moscow, Abstract 3MS<sup>3</sup>-MR-06.

#### **Доклады на конференциях:**

*Kuzmin R.O., Zabalueva E.V., Litvak M.L., Mitrofanov I.G.*, Particularities of the inter-years and seasonal variations of the water equivalent content within the surficial soil layer on Mars revealed based on the data analysis of the HEND instrument observations, *European Planetary Science Congress*, 23-28 September 2012 yr, Madrid, Spain;

*Kuzmin R.O., Zabalueva E.V., Evdokimova N.A., Litvak M.L., Mitrofanov I.G. and Christensen P.R.*, Seasonal and inter-years variations of the water content within the surficial layer of the Martian soil revealed based on the TES, the OMEGA and the HEND data analysis, *III Moscow International Solar System Symposium*, 8-11 October 2012, IKI RAS, Moscow.

### **Проект 3.3: Проблема эволюции глобальной вулканической активности Венеры**

#### **Научный рук. Старший научный сотрудник ГЕОХИ РАН, кт-мн М.А. Иванов**

Составленная глобальная геологическая карта Венеры показывает пространственное и временное распределение специфических образований вулканического происхождения и позволяет подойти к глобальной оценке смены стилей вулканической активности и соотнести их с основными эпизодами геологической истории Венеры.

Морфология главных вулканических подразделений Венеры, их стратиграфические соотношения друг с другом и тектоническими образованиями и характерные топографические ассоциации позволяют заключить, что: (1) основные детали поверхности Венеры (большинство тектонизированных местностей, основные поля вулканического материала, главные детали длинноволновой топографии) были сформированы в начале или в первой половине видимой геологической истории планеты; (2) на протяжении обозримой геологической истории (0.5-1 млрд лет) в глобальном масштабе произошла смена режимов эндогенной активности от

тектонического режима к вулканическому; (3) вулканический режим обновления поверхности характеризовался отчетливой сменой стиля вулканической активности, связанной с изменениями типов магматических источников; (4) крутосклонные купола, в основном, представляют собой продукт специфического типа вулканизма щитовых равнин и, вероятно, связаны с дифференциацией расплавов в приповерхностных магматических резервуарах.

#### **Публикации по проекту за 2012 г.:**

*Ivanov M.A. and Head J.W.*, 2012, Formation and evolution of the midlands on Venus: Geological features and structures, stratigraphic relationships and geologic history of the Fredegonde area (V-57), Planetary and Space Sci., accepted, on-line version.

*Гусева Е.Н., Базилевский А.Т., Хэд Дж. У.* Оценка возраста ударных кратеров и прилегающих к ним других геологических подразделений в области Тетис, Венера. Подготовлена для публикации в журнале Астрономический Вестник.

#### **Доклады на конференциях:**

*Ivanov M.A. and Head J.W.*, 2012, Evolution of volcanism on Venus, 43rd Lunar and Planetary Conference, Houston, USA abstr. 1037.

*Ivanov M.A. and Head J.W.*, 2012, Evolution of volcanism on Venus, 3rd Moscow International Solar System Symposium; Moscow, Russia. Abstract 3MS3\_VN-13.

*Guseva E.N., Basilevsky A.T., Head J.W.* Impact craters of Thetis Regio (V36 quadrangle), Venus/ The third Moscow Solar System Symposium (3M-S<sup>3</sup>) Moscow. 2012. Abstract 3MS3-PS-38.

### **Проект 3.4. Анализ ресурсов воды на Луне перспективных для использования при освоении этого небесного тела**

**Научный руководитель зав. лаборатории ГЕОХИ РАН профессор А.Т.**

**Базилевский**

За отчетный период сделан обзор публикаций по проблеме лунной воды. Показано, что на Луне существуют три резервуара воды, два из которых, - примесь льда в реголите холодных ловушек полярных областей и вода в лунных магматических системах, - заслуживают изучения как возможные ресурсы, важные для практического освоения Луны. Третий резервуар, - глобально распространенные H<sub>2</sub>O и/или OH в тонком (миллиметры) слое лунной поверхности, - возможно, служит одним из источников льда воды на лунных полюсах. Для резервуара полярного льда начата работа по выявлению возможных причин отсутствия льда в некоторых холодных ловушках. На примере полярного кратера Шеклтон с вечно затененным днищем показано, что отсутствие ассоциирующей с ним отрицательной аномалии потока эпитепловых нейтронов, возможно, вызвано сходами материала реголита вниз по склонам кратера. Для резервуара воды в лунных магматических системах начата оценка толщины пирокластических покровов. Показано, что толщина пирокластического покрова района Литтров-Тавр колеблется от нескольких дециметров до 10-15 м.

Выполнены исследования оливина из образца «Луны 24», микроструктурные признаки которого указывают на то, что он, находясь в недрах Луны, имел в своем составе примесь «воды», а при подъеме к поверхности потерял ее. Это подкрепляет идею присутствия на Луне «эндогенной» воды.

**Публикации по проекту за 2012 г.:**

*Базилевский А.Т., Абдрахимов А.М., Дорофеева В.А.* *Астрономический вестник.* 2012. Т. 46. № 2. 99-118.

*Khisina N.R., Wirth R., Abart R., Rhede D. and Heinrich W.* Oriented chromite-diopside symplectic inclusions in olivine from lunar regolith delivered by “Luna-24” mission. *Geochimica et Cosmochimica Acta* (принята к печати).

*Иванов А.В.* Летучие компоненты в образцах лунного реголита. Обзор. Представлен в *Астрономический Вестник* 8.11.2012.

*Абдрахимов А.М., Иванов М.А., Базилевский А.Т., Диксон Дж.Л., Хэд Дж.У., Чик Л., Уиттен Дж., Зубер М.Т., Смит Д.Е., Мазарико Е., Нэши К.Д., and Басси Д.Б.Дж.* Геологическое строение области кандидатов районов посадки КА Луна-Глоб. Характеристика по данным миссии Лунар Реконессанс Орбитер и другим данным. Подготовлена для публикации в журнале *Астрономический Вестник*.

*Иванов М.А., Абдрахимов А.М., Базилевский А.Т., Диксон Дж.Л., Хэд Дж.У., Чик Л., Уиттен Дж., Зубер М.Т., Смит Д.Е., Мазарико Е., Нэши К.Д., and Басси Д.Б.Дж.* Геологическое строение потенциальных районов исследований миссией посадочного аппарата Луна-Глоб (70-85° ю.ш., 0-60° в.д.): Характеристика по данным миссии Лунар Реконессанс Орбитер и другим данным. Подготовлена для публикации в журнале *Астрономический Вестник*.

**Доклады на конференциях:**

*Basilevsky A.T., Abdrakhimov A.M., Slyuta E.N., Ivanov A.V., Ivanov M.A., Khisina N.R., Dorofeeva V.A. Head J.W., Pieters C.M., Zuber M. T.* Study of water resources on the Moon: First results and working plans. The third Moscow Solar System Symposium (3M-S<sup>3</sup>) Moscow. 2012. Abstract 3MS3-MN-04.

*Базилевский А.Т., Абдрахимов А.М., Иванов А.В., Хисина Н.Р., Дорофеева В.А.* Неполярная вода на Луне. 1-я Всероссийская научная школа-конференция по астробиологии. «Астробиология: от Происхождения Жизни на Земле к Жизни во Вселенной» (памяти Давида Гиличинского). 16 – 19 сентября 2012 г. г. Пущино.

*Basilevsky A.T., Marov M.Ya., Head J.W., Pieters C.M., , Zuber M.T.* Study of water resources on the Moon. Second Skolkovo Tech Research Center Proposers Conference, July 9–10, 2012, Moscow region, Odintsovsky district, Skolkovo village.

*Khisina N., Wirth R., Abart R., Rhede D., Heinrich W.* (2012) Oriented symplectic inclusions in lunar olivine: an evidence for H<sub>2</sub>O in lunar magmas? (2012) Abstracts of European Lunar Symposium, Berlin, April 19-20, p. 59.

*Khisina N.R., Wirth R., Rhede D.* (2012) Oriented chromite-diopside symplectic inclusions in lunar olivine from the “Luna-24” soil: hydrogenation-dehydrogenation as a mechanism of symplectic formation?, 43<sup>rd</sup> Lunar and Planetary Science Conference, Houston, Abstract #1068

*Хисина Н.Р.* (2012) Происхождение ламелярных пироксен-шпинелевых симплектитов в оливинах земного и внеземного происхождения: реакция дегидрогенизации и окисления оливина. Материалы IV Всероссийской молодежной научной конференции «Минералы: строение, свойства, методы исследования», Екатеринбург, УрО РАН, С.59-61.

### **Проект3.5: Радиолокационное зондирование поверхностных и подповерхностных структур грунта Луны**

**Научный рук.: зав. лаб. ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН д. ф.-м. н. В. М. Смирнов**

Радиолокационное зондирование поверхности и приповерхностного слоя Луны низкочастотным радиолокационным комплексом РЛК-Л с борта орбитального модуля планируется в российской миссии «Луна-Глоб». Для прогноза результатов радиолокационных экспериментов и отработки экспериментальных данных разработана методика моделирования, имитирующая процесс зондирования лунного грунта радиосигналами с параметрами, аналогичными РЛК-Л. Создана и программно реализована методика расчета отраженного сигнала от грунта в приближении геометрической оптики с учетом высоты космического аппарата над поверхностью, времени приема отраженного сигнала и рельефа зондируемой поверхности. Проведено моделирование процесса формирования сигнала радара РЛК-Л, отраженного поверхностью Луны в районе кратера Анаксагор с учетом топографической информации, предоставленной Комплексной лабораторией исследования внеземных территорий (МИИГАИК) в виде массива цифровой 3-D модели поверхности Северных районов Луны. Результаты моделирования показали, что радиус пятна поверхности, интенсивно отражающей сигнал, составляет 2-3 зоны Френеля, по форме спектра отраженного сигнала можно судить о типе рельефа в районе проведения эксперимента. Показано, что для определения глубинного распределения диэлектрических

характеристик приповерхностного слоя грунта должна быть учтена топография района зондирования или разработана методика учета и коррекции влияния рельефа.

#### **Публикации по проекту за 2012 г.:**

*Смирнов В.М., Юшкова О.В., Карачевцева И.Р., Надеждина И.Е.* Влияние рельефа при формировании отраженного сигнала радара подповерхностного зондирования. Подготовлены материалы для статьи в журнал «Астрономический вестник»

#### **Доклады на конференциях**

*Pyushin Ya.A., Smirnov V.M., Yushkova O.V.* Deep subsurface radar sounding of rough extraterrestrial terrains: numerical simulations. 6-UWBUSIS, Sevastopol, Ukraine, 2012

*Smirnov V. M., Yushkova O.V., Karachevtseva I.P., Nadezhkina I. E.* Influencing topography on formation of reflected signal of Lunar radar. III Moscow International Solar System Symposium, IKI, 2012

*Смирнов В.М., Юшкова О.В., Карачевцева И.Р., Надеждина И.Е.* Влияние рельефа при формировании отраженного сигнала радара подповерхностного зондирования. 6 Всероссийская конференция «Радиолокация и связь», ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, 2012.

### **Проект 3.6. Магнетизм, тепломассоперенос и эволюция системы ядро-мантия в планетах земной группы и Луны**

**Научный рук. зав. отд. ИЗМИРАН, проф. С. В. Старченко**

По результатам анализа величины доступной для гидромагнитного динамо энергии, физических закономерностей и наблюдательных данных определены типичные масштабы, скорости и магнитные поля в недрах планет. Обосновано, что при генерации геомагнитного поля и древнего магнитного поля Марса магнитная энергия превосходит кинетическую энергию конвекции, а когда эти энергии сравнимы, то генерируются меньшие поля Меркурия и Ганимеда. Исследована устойчивость конвекции для жидких ядер планет земной группы. Критические частоты и числа Рэлея получены асимптотически и численно при характерных для планет числах Прандтля и толщинах сферических слоев. Впервые получено аналитическое решение типа ВКБ в пределе, когда радиус внутренней границы жидкого ядра мал по сравнению с внешним радиусом и источники конвекции концентрируются у внутренней границы. Последнее актуально для генерации древнейшего магнитного поля Марса, если, следуя общепринятой концепции, считать, что вскоре после аккреции планеты образовалось массивное жидкое ядро, из которого начало кристаллизоваться твердое ядро. Предлагается альтернативная концепция протоядра, которая, на наш взгляд, лучше согласуется с энергетикой системы ядро-мантия, палеомагнитными и изотопными данными. При этом после аккреции так же образовалось жидкое ядро, но под ним было массивное протоядро, которое миллиарды лет растворялось в жидком ядре. При

растворении из протоядра выделяется легкая фракция, которая всплывая к границе с мантией, порождает мощную композиционную конвекцию, генерирующую магнитное поле и поддерживающую конвекцию в мантии. Следуя концепции протоядра, в современном Марсе уже давно остановился рост жидкого ядра за счет твердого протоядра, что привело к остановке динамо и конвекции в мантии. В Меркурии же протоядро еще продолжает замедленно растворяться под влиянием приливных воздействий Солнца дополнительно перегревающих жидкое ядро, что и приводит к необычно малому и сдвинутому к полюсу магнитному диполю.

#### **Публикации с благодарностью проекту принятые в печать в 2012 г.:**

*Starchenko S.V., Pushkarev Y.D.* Magnetohydrodynamic scaling of geodynamo and planetary protocore concept. *Magnetohydrodynamics*. V.49. No 1. 2013.

*Старченко С.В., Котельникова М.С.* Критическая устойчивость почти адиабатической конвекции во вращающемся быстро и широком сферическом слое. *ЖЭТФ*. Т.143. вып.2. 2013.

*Старченко С.В.* Энергетическое масштабирование геодинамо. *Геомагнетизм и Аэрономия*. Т.53. № 2. 2013.

*Starchenko S. V.* Energetically determined planetary magnetic intensities, scales and velocities. *Proceedings of the 9th International Conference "Problems of Geocosmos"*, St. Petersburg. 2012.

#### **Доклады на конференциях**

*Старченко С.В.* Законы масштабирования конвекции и магнетизма в недрах Земли и планет. Тезисы 2-ой научной конференции ПОЛАР 2012, 22-26 мая 2012г. ИЗМИРАН. С.29-30.

*Pushkarev Y.D., Starchenko S. V.* Geomagnetic field generation as result of the protocore dissolution. *Book of abstracts of the 9th International Conference "Problems of Geocosmos"*, St. Petersburg. 2012. P.67.

*Starchenko S.V.* Conductivity independent scaling laws for convection and magnetism in fast rotating planets (keynote talk). *European Planetary Science Congress 2012, Madrid, Spain*.

*Starchenko S.V., Kotelnikova M.S.* Almost adiabatic convection in liquid cores of terrestrial planets with small inner cores. *European Planetary Science Congress 2012, Madrid, Spain*.

*Pushkarev Y.D., Starchenko S.V.* Disintegration of the solid protocores of the terrestrial planets as a reason of magnetic field generation. *European Planetary Science Congress 2012, Madrid, Spain*.

### **Проект 3.7. Разработка лунной солнечной электростанции для энергоснабжения долговременных баз на поверхности Луны**

**Руководитель проекта: г. н. с. ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, д.ф.-м. н. В.Д.**

**Румянцев**

Проблема энергообеспечения лунных баз имеет первостепенное значение при освоении Луны и использовании имеющихся там сырьевых ресурсов. При наличии ископаемой воды появляется возможность ее электролиза с получением водорода и кислорода для жизнеобеспечения, заправки космических транспортных средств



компонентами топлива, а также для технологических нужд. По данным исследований, наиболее вероятными местами для добывания воды являются приполярные области. Это диктует необходимость учета факторов окружающей среды именно высокоширотных областей Луны при разработке фотоэлектрических станций. Преодоление факторов ультрафиолетовой и радиационной деградации фотопреобразователей при обеспечении высокого КПД возможно только при применении солнечных элементов каскадного типа на базе материалов  $A^3B^5$  в паре с линзовыми концентраторами солнечного излучения. Слежение концентраторных модулей за солнцем обеспечит максимальную дневную выработку электроэнергии.

При выполнении проекта дан анализ состояния разработок трехкаскадных элементов со структурой InGaP/GaAs/Ge и низким внутренним сопротивлением, а также концентраторов излучения в виде цилиндрических линз Френеля с тонкослойной структурой «стекло-силикон». Изготовлены прототипы концентраторных суб-модулей и измерены их выходные фотоэлектрические параметры с помощью специально разработанного импульсного имитатора солнечного излучения с коллимированным световым потоком. Полученные данные использованы для определения массогабаритных и энергетических характеристик пилотной электростанции, которая может быть развернута в автоматическом режиме на конструктивной базе аппарата, спускаемого на поверхность Луны. При КПД концентраторных модулей 30% солнечная станция с шестью модулями размерами 1740x2730 мм<sup>2</sup> генерирует мощность 11,3 кВт. Модули в развернутом виде подвешены на центральной мачте. Слежение модулей за солнцем осуществляется по фотоэлектрическому датчику путем азимутального поворота мачты. Слежение по углу места на широтах вблизи 80° не требуется. Спускаемый аппарат снабжен откидными стенками с расположенными на них плоскими солнечными батареями резервного питания, а также включает в себя контейнеры с сопутствующим оборудованием.

#### **Публикации за 2012 г.**

*Rumyantsev V.D., Larionov V.R., Malevskiy D.A., Pokrovskiy P.V., Chekalin A.V.* Evaluation of the solar cell internal resistance in I-V measurements under flash illumination. *AIP Conf. Proc.* 1477, pp.152-156 (2012); doi: 10.1063/1.4753856.

#### **Научные доклады**

*Rumyantsev V.D., Ashcheulov Yu.V., Chekalin A.V., Davidyuk N.Yu., Malevskiy D.A., Monastyrenko A.O., Pokrovskiy P.V., Sadchikov N.A., Terra A.R., Andreev V.M.,* Solar concentrator installations for “In Field” and “On Roof” deployment”. *Proc. of the 8th International Conference on Concentrating Photovoltaics (CPV-8)*, 2012, Toledo, Spain.

*Rumyantsev V.D., Larionov V.R., Malevskiy D.A., Pokrovskiy P.V., Pan'chak A.N.* Multifunctional flash solar simulator: 3 in 1. *Proc. of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 24-28 September 2012, Frankfurt, Germany (to be published).