

## ЯРЧЕ ТЫСЯЧИ СОЛНЦ

*С точки зрения астрономов, наше Солнце — звезда спокойная. Однако время от времени на нем возникают вспышки, и поток жесткого электромагнитного излучения от светила увеличивается в тысячи раз. Уже через восемь минут после начала вспышки невидимые ультрафиолетовые, рентгеновские и гамма-лучи достигают орбиты Земли. Потоки заряженных частиц, ускоренных до гигантских энергий, и огромные выбросы плазмы внезапно обрушиваются в межпланетное пространство. К счастью, атмосфера Земли защищает нас от опасного излучения, а ее магнитное поле — от заряженных частиц. Однако даже на Земле, а тем более в космосе солнечные вспышки весьма опасны, и необходимо уметь заблаговременно их прогнозировать.*

*Изучение физического механизма вспышек на основе теоретических исследований (аналитических и численных) и современных наблюдательных данных, получаемых космическими и наземными обсерваториями, — ключевая проблема современной физики Солнца, имеющая научное и прикладное значение.*

*Исследуя эту проблему, автор, заведующий отделом физики Солнца Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ), создал теорию пересоединения и ускорения частиц в высокотемпературных турбулентных токовых слоях в космической плазме с сильным магнитным полем. На основе своей теории и наблюдений Солнца он предложил и разработал теорию вспышек — топологическую модель «Радуга» и эффекта ускорения частиц в коллапсирующих магнитных ловушках, теорию наблюдаемых проявлений вспышки в ультрафиолетовом и рентгеновском излучениях.*

**Сомов Б., д.ф.-м.н.**

### **Солнце и мы**

Ближайшая к нам звезда, Солнце, расположена на расстоянии восьми световых минут. Это очень мало по сравнению с четырьмя световыми годами до второй ближайшей звезды — Проксима Центавра. Солнце родилось около пяти миллиардов лет тому назад. Внутри него идут ядерные реакции, благодаря которым существует жизнь на Земле. Построенные на современных наблюдениях модели строения и эволюции Солнца не оставляют сомнений в том, что оно будет сиять еще миллиарды лет.

Температура на поверхности Солнца, в фотосфере, около шести тысяч градусов, а в его короне превышает миллион градусов. Поэтому Солнце служит ярким источником ультрафиолетовых и рентгеновских лучей. Кроме того, раскаленная корона испускает быстрые потоки заряженных частиц — солнечный ветер.

Излучение Солнца — главный источник энергии для земной атмосферы. Фотохимические процессы, идущие в ней, особенно чувствительны к жесткому ультрафиолету, который оказывает сильное ионизирующее воздействие. Однако оно поглощается в верхних слоях атмосферы, создавая озон, который служит защитой от ультрафиолета. Поэтому когда на молодой Земле кислорода в атмосфере было мало, а озон отсутствовал, жизнь существовала только в океане. Позднее, примерно 400 миллионов лет назад, озоновый

слой появился, благодаря чему жизнь вышла на сушу, и с тех пор он защищает нас от разрушительного воздействия излучения.

Магнитное поле Земли, ее магнитосфера, препятствует прониканию к Земле частиц солнечного ветра. Когда его порывы взаимодействуют с магнитосферой, некоторое количество быстрых частиц все-таки высыпается вблизи магнитных полюсов Земли, порождая красочное свечение атмосферы — полярные сияния.

Увы, гармонию наших отношений с Солнцем нарушают солнечные вспышки.

### **Вспышки на солнце**

Наша обеспокоенность вспышками на Солнце неслучайна. Большие вспышки оказывают сильное воздействие на околоземное космическое пространство. Потоки частиц и излучения опасны для космонавтов. Кроме того, они могут повредить электронные приборы космических аппаратов, повлиять на их работу (см. «Наука и жизнь» №№ 5, 10, 2001 г.).

Ультрафиолет и рентгеновские лучи резко увеличивают ионизацию в верхних слоях атмосферы Земли, в ионосфере. Это может приводить к нарушениям радиосвязи, сбоям в работе радионавигационных приборов кораблей и самолетов, радиолокационных систем, авариям на длинных линиях электропередач. Частицы высоких энергий, проникая в верхнюю атмосферу Земли, раз-

рушают озоновый слой. Содержание озона уменьшается из года в год. Широкую дискуссию вызывает вопрос о вероятной связи между активностью Солнца и климатом на Земле (см. «Наука и жизнь» № 5, 2002 г.; № 7, 2006 г.).

Ударные волны и выбросы солнечной плазмы после больших вспышек вызывают сильные возмущения магнитосферы, магнитосферные бури. Не исключено, что возмущения магнитного поля на поверхности Земли могут влиять на живые организмы, на состояние биосферы Земли, хотя столь прямое воздействие солнечных вспышек кажется пренебрежимо малым по сравнению с другими факторами нашей повседневной жизни.

Последние десятилетия несколько космических обсерваторий пристально вглядываются в «разгневанное» Солнце с помощью специальных рентгеновских и ультрафиолетовых телескопов. Сейчас работают четыре таких космических аппарата: «SOHO» (Solar and Heliospheric Observatory), «TRACE» (Transition Region and Coronal Explorer), «RHESSI» (Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) и российский спутник «Coronas-F».

#### Как предсказать вспышки

Необходимость прогнозировать солнечные вспышки возникла давно, но особенно остро она проявилась в связи с пилотируемыми космическими полетами. Долгое время, почти независимо и практически безрезультатно, разрабатывались два подхода: синоптический и казуальный (причинный).

Первый подход сходен с предсказанием погоды. Он основан на изучении особенностей ситуаций на Солнце перед вспышками. Второй подразумевает знание физического механизма вспышки и соответственно распознавание предвспышечной ситуации путем ее моделирования.

До начала космической эры на протяжении многих лет наблюдения вспышек велись преимущественно в видимом диапазоне излучения: в H $\alpha$ -линии водорода (656, 285 нм, красный свет), в «белом свете» (непрерывном спектре видимого излучения). Наблюдения в линиях спектра, чувствительных к магнитному полю, позволили установить связь вспышек с магнитными полями в фотосфере. Часто вспышка видна как увеличение яркости хромосферы (слой непосредственно над фотосферой) в виде двух лент, расположенных в областях полей с противоположной полярностью. Радионаблюдения подтверждали эту закономерность, имеющую принципиальное значение для физики вспышки, но ее понимание оставалось на чисто эмпирическом уровне.

Уже первые внеатмосферные наблюдения Солнца показали, что вспышки представляют собой корональное, а не хромосферное явление. Результаты современных наблюдений свидетельствуют, что источник энергии вспышки расположен под аркадой петель в короне, наблюдаемых в ультрафиолетовом излучении (рис. 1).

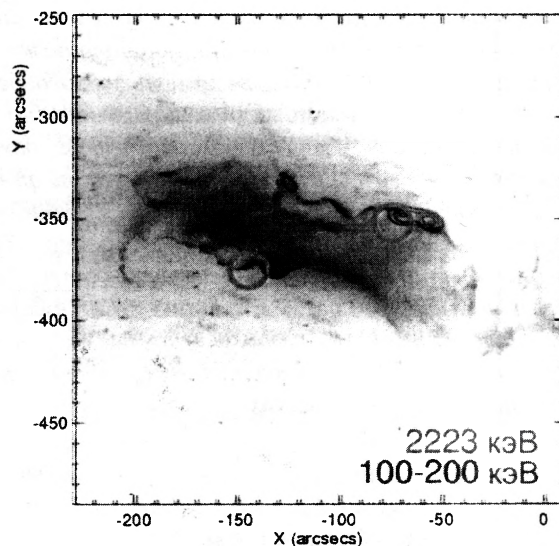


Рис. 1. Гигантская вспышка 28 октября 2003 года недалеко от центра солнечного диска (вид сверху). Фоновое изображение демонстрирует аркаду петель, как они видны на длине волны 19,5 нм со спутника «RHESSI». Синим и красным цветом показаны источники жесткого рентгеновского (100–200 кэВ) и гамма-излучения (2223 кэВ)

Аркады опираются на хромосферные вспышечные ленты, простирающиеся по разные стороны линии раздела полярности фотосферного магнитного поля. Особенно хорошо петли видны во вспышках, происходящих вблизи солнечного лимба (рис. 2). Очевидно, в будущем прогнозирование вспышек будет базироваться на объединении обоих этих методов с учетом магнитной природы вспышки и ее коронального происхождения.

#### Энергия вспышки

Вспышка — самое мощное из всех проявлений активности Солнца. Энергия большой вспышки в сотни раз превышает энергию, которую можно получить при сжигании всех запасов нефти и угля на Земле. На Солнце она выделяется за несколько минут. Однако эта гигантская энергия меньше сотых долей процента от мощности излучения Солнца в оптическом диапазоне, называемой солнечной постоянной. Поэтому при вспышке не происходит заметного увеличения видимой яркости Солнца. Вспышки мы не видим.





Рис. 2. Вид на солнечную корону и аркаду петель в ней во время вспышки 21 марта 2001 года. Изображение на длине волны 17,1 нм получено при помощи ультрафиолетового телескопа, установленного на спутнике «TRACE»

Откуда и как черпает свою огромную энергию вспышка? Ее источник — магнитное поле в атмосфере Солнца. Оно определяет морфологию и энергетику той активной области, где произойдет вспышка. Здесь энергия поля много больше, чем энергия плазмы. Во время вспышки энергия поля превращается в энергию частиц плазмы [1]. Физический процесс, обеспечивающий такое превращение, называется магнитным пересоединением.

**Что такое пересоединение**

Рассмотрим простейший пример, который демонстрирует явление магнитного пересоединения. Два параллельных проводника расположены на расстоянии  $2L$  один от другого. По каждому из проводников течет электрический ток  $I$ . Магнитное поле этих токов состоит из трех различных магнитных потоков (рис. 3 а). Два из них (показаны синим и зеленым цветом) принадлежат соответственно верхнему и нижнему токам; каждый поток охватывает свой проводник. Они расположены внутри линии поля  $A$ , (сепаратрисы), которая образует «восьмерку» с точкой пересечения типа буквы  $X$  (далее  $X$ -точкой). Третий поток расположен вне сепаратрисы; он принадлежит одновременно обоим токам. Голубым цветом показана одна из линий поля общего магнитного потока двух токов.

Если сблизить проводники на расстояние  $\delta$ , магнитные потоки перераспределятся. Собственные потоки каждого из токов уменьшатся на величину  $\delta A$ , а их общий поток, показанный зеленым и синим цветом, увеличится на ту же величину. Этот процесс и называется магнитным пересоединением [2]. Он осуществляется следующим образом. Две линии поля подходят к  $X$ -точке сверху и снизу,

сливаются в ней, образуя сепаратрису, и затем соединяются так, чтобы получилась новая линия поля, которая охватывает оба тока.

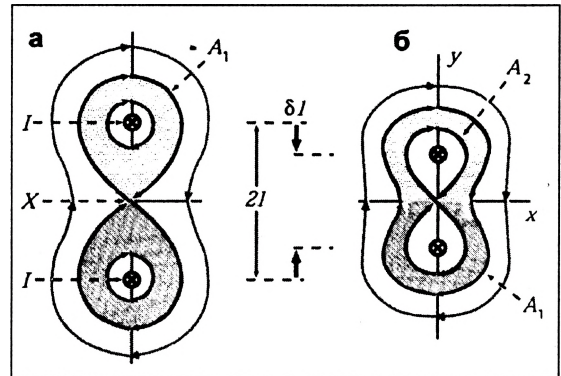


Рис. 3. Магнитное поле двух параллельных электрических токов одинаковой величины  $I$ : а — в начальный момент времени; б — после того как токи были сблизены на расстояние  $\delta l$  каждый. Так происходит пересоединение в вакууме

Так происходит пересоединение в вакууме. Это реальный физический процесс, который легко воспроизвести в лаборатории. Пересоединение магнитного потока индуцирует электрическое поле  $E$ , величину которого можно оценить, разделив  $\delta A$  на характерное время  $\delta t$  процесса пересоединения, то есть на время движения проводников. Это поле направлено перпендикулярно плоскости рисунка. Его можно измерить прибором. Электрическое поле ускоряет заряженную частицу, если мы поместим ее вблизи  $X$ -точки, точнее говоря  $X$ -линии, совпадающей с осью  $z$  декартовой системы координат (рис. 3 б).

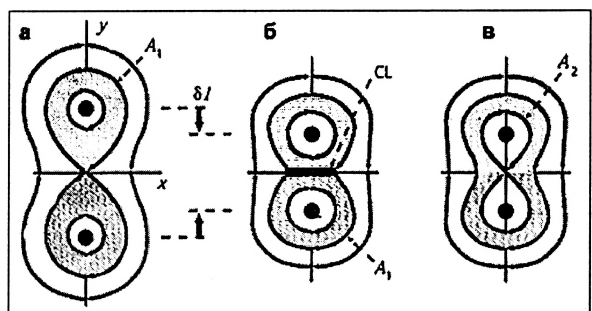


Рис. 4. Магнитное пересоединение в плазме: а и в — соответственно начальное и конечное состояние, то же, что на рис. 3; б — промежуточное состояние с токовым слоем  $CL$

Плазма солнечной короны отличается от вакуума очень высокой электрической проводимостью. Появившись, поле  $E$  сразу же порождает электрический ток, направленный вдоль  $X$ -линии. Он приобретает форму токового слоя, который препятствует процессу пересоединения (рис. 4 б).

Это приводит к накоплению избытка магнитной энергии токового слоя.

**Токовые слои и вспышки**

Токовый слой представляет собой магнито-плазменную структуру, как минимум двухмерную и, как правило, двухмасштабную. Переседающий слой в принципе нельзя описать одномерной моделью, поскольку втекание плазмы в слой и вытекание из слоя осуществляются в перпендикулярных направлениях (рис. 5 а). Наличие двух масштабов означает, что обычно ширина слоя  $2b$  много больше его толщины  $2a$ . Это важно, поскольку, чем шире слой, тем большую энергию он может накопить. Между тем малая толщина слоя отвечает за скорость диссипации накопленной энергии. Эти фундаментальные свойства переседающего токового слоя составляют основу модели солнечной вспышки.

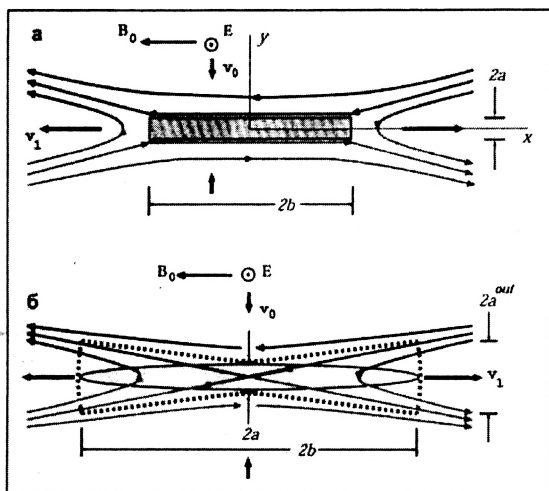


Рис. 5. Две модели токового слоя: а — классическая модель — нейтральный слой, где  $2a$  — толщина слоя,  $2b$  — его ширина; короткими толстыми стрелками  $v_0$  показаны скорости втекания плазмы в слой, длинными  $v_1$  — скорости вытекания; б — высокотемпературный турбулентный токовый слой (ВТТТС);  $2a^{out}$  — эффективная толщина слоя для вытекающих из него потоков энергии и плазмы

**«Радуга» и «молнии» на солнце**

Первоначально взаимодействие магнитных потоков в атмосфере Солнца рассматривалось исключительно как результат всплывания нового магнитного поля из-под фотосферы в корону (рис. 6). Новый магнитный поток в виде пары солнечных пятен пив, поднимаясь со скоростью  $V$ , взаимодействует с ранее всплывшим потоком активной области в виде пятен  $N$  и  $S$ . Линия поля  $A$ , в начальный момент служит сепаратрисой

(рис. 6а); она пересоединится первой в нулевой точке  $X$ . Однако сначала здесь образуется токовый слой  $CL$  (рис. 6 б). С ним связано накопление энергии перед вспышкой. В результате пересоединения произойдет вспышка, а магнитное поле придет в конечное состояние без токового слоя (рис. 6 в). Такова простейшая схема накопления и освобождения энергии в солнечной вспышке.

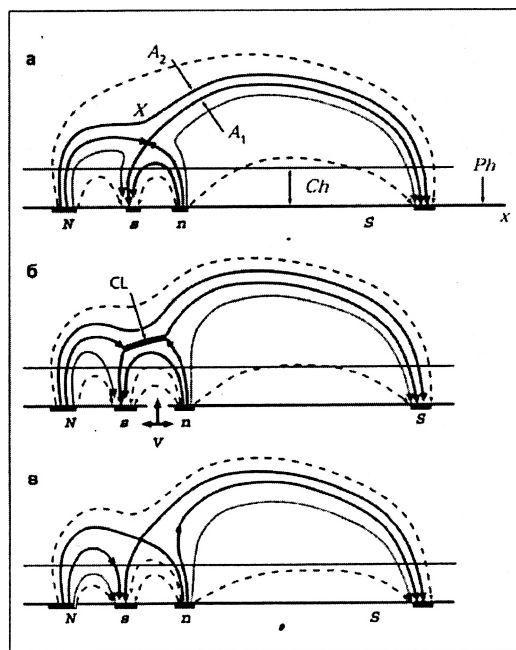


Рис. 6. Три состояния магнитного поля в короне, аналогичные состояниям, показанным на рис. 4: а — начальное состояние; б — состояние перед вспышкой; в — конечное состояние после пересоединения

Между тем взаимодействие магнитных потоков в атмосфере Солнца — гораздо более общее явление. Например, вихревые течения плазмы в фотосфере приводят к появлению в короне особых линий магнитного поля — сепараторов. Сепаратор появляется над S-образным изгибом фотосферной нейтральной линии (рис. 7) подобно радуге над изгибом реки. Такие изгибы весьма характерны для магнитограмм больших вспышек.

По структуре поля сепаратор отличается от  $X$ -линии лишь тем, что содержит продольную составляющую магнитного поля. Продольное поле  $B_{||}$  разумеется, не запрещает процесс пересоединения, так как присутствует внутри и вне формирующегося вдоль сепаратора токового слоя. Оно влияет только на скорость пересоединения поперечных составляющих поля  $B_{\perp}$  и, следовательно, на мощность процесса преобразования энергии поля в тепловую и кинетическую энергии частиц.



Это позволяет лучше понять и точнее объяснить особенности выделения энергии во вспышке.

Вспышка — быстрое магнитное пересоединение, которое подобно гигантской молнии, протекающей вдоль радуги сепаратора. Оно связано с сильным электрическим полем  $E$  (больше  $10\text{--}30$  В/см) в высоко-температурном (более  $10^8$  К) турбулентном токовом слое (ВТТС, рис. 5 б), несущем огромный электрический ток (порядка  $10^{11}$  А). Таковы реальные условия в источнике энергии солнечной вспышки.

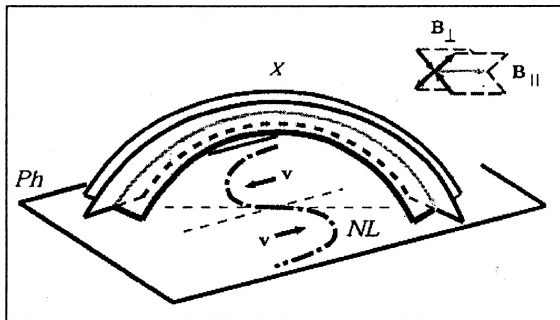


Рис. 7. Вихревое течение со скоростью  $v$  в фотосфере  $Ph$  деформирует нейтральную линию так, что она приобретает форму буквы  $S$ . Над ее  $S$ -образным изгибом появляется топологически особая линия поля — сепаратор  $X$ . В правом верхнем углу показана структура поля вблизи его вершины, где  $B_{\perp}$  и  $B_{\parallel}$  — его поперечная и продольная составляющие

### Механизм ускорения частиц

Ускорение частиц до высоких энергий всегда считалось наиболее трудной частью проблемы солнечных вспышек. В рамках теории ВТТС общее аналитическое решение релятивистского уравнения движения частицы в пересоединяющем токовом слое демонстрирует возможность устойчивого движения, при котором частица остается в слое достаточно долго. Там она постепенно набирает энергию и покидает его только в результате ограниченности его размеров — длины и ширины. Из уравнений найдены условия устойчивости, соответствующие достаточно сильному электрическому полю  $E$  при наличии в токовом слое поперечной и продольной составляющих магнитного поля  $B_{\parallel}$  и  $B_{\perp}$  характерных для пересоединения на сепараторе.

Физический смысл этих условий прост. Скорость частиц в плоскости слоя в направлении, перпендикулярном к электрическому полю, отлична от нуля, но значительно меньше скорости в продольном направлении. Кроме того, в поперечном направлении частица совершает колебательные движения. Однако главный эффект — уско-

рение частиц до скорости порядка световой — наблюдается вдоль электрического поля.

Для случая магнитного пересоединения в ВТТС солнечной вспышки сравнение аналитических решений с результатами численного интегрирования исходных уравнений движения, усредненных по упомянутым выше колебаниям, подтверждает выводы, полученные аналитическим методом. Главный из них состоит в том, что рассчитываемый режим ускорения весьма эффективен — он позволяет объяснить ускорение частиц во вспышке до высоких энергий.

### Место ускорения частиц

При ускорении электрическим полем частицы с зарядами разных знаков движутся в противоположных направлениях. Как следствие, положительные и отрицательные частицы покидают токовый слой вдоль различных линий магнитного поля. Этот вывод согласуется с наблюдениями спутника «RHESSI», которые показали, что источники жесткого рентгеновского излучения, вызываемого ускоренными электронами, и источники гамма-излучения, связанного с ускоренными ионами, во вспышке 28 октября 2003 года пространственно разделены (см. рис. 1).

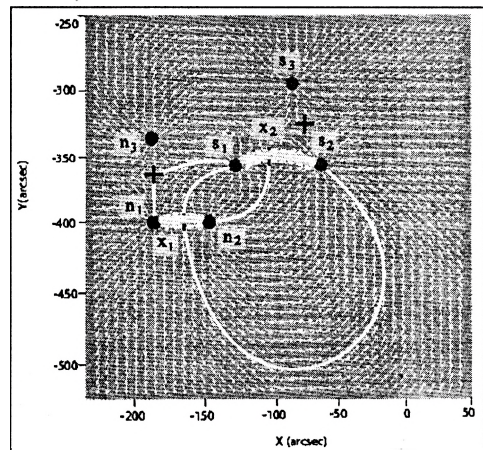


Рис. 8. Математическое моделирование вспышки 28 октября 2003 года, показанной на рис. 1. Дан «топологический портрет» активной области:  $n_1\text{--}n_3$  и  $s_1\text{--}s_3$  — эффективные источники магнитного поля; желтые стрелки указывают направление поля в плоскости источников;  $x_1$  и  $x_2$  — нулевые точки поля, служащие основаниями сепаратора. Голубым цветом показаны участки вспышечных лент, созданных пересоединением вблизи вершины сепаратора

Применительно к этой гигантской вспышке был исследован вопрос о месте ускорения электронов и ионов. Была построена топологическая модель магнитного поля в активной области (рис. 8), где

произошла вспышка. Суть моделирования в том, что крупномасштабное магнитное поле активной области заменяется модельным, источники которого под фотосферой подбираются так, чтобы рассчитываемая магнитограмма фотосферного поля наилучшим образом соответствовала наблюдениям. Модель должна воспроизводить главные особенности фотосферного поля: не менее четырех наиболее существенных его источников (солнечных пятен и/или фоновых полей), форму границы областей различной магнитной полярности.

Когда это удастся сделать, модель воспроизводит топологические особенности крупномасштабного поля в короне, а именно сепаратрисные поверхности и линии их пересечения — сепараторы. Сравнение рис. 8 и 1 позволяет сделать вывод, что во вспышке 28 октября 2003 года электроны и ионы ускорились одновременно в токо-

вом слое вблизи вершины «главного» сепаратора. Этот сепаратор расположен в области наиболее сильных источников магнитного поля и представляет собой линию поля в короне, соединяющую нулевые точки  $x_1$  и  $x_2$  под фотосферой. Ускоренные электроны и ионы вторгаются в хромосферу в существенно различных местах (рис. 8).

Наблюдаемое запаздывание гамма-излучения относительно жесткого рентгеновского излучения можно объяснить тем, что формирование тормозного излучения электронов и линии 2,2 МэВ, возникающей в процессе синтеза дейтерия, происходит различным образом. Представленная здесь модель отражает общие физические свойства широкого класса больших солнечных вспышек, по видимому, самых больших.

Ж-л «Наука и жизнь» № 8 2007 г.

## ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ОТХОДАМИ И ВТОРИЧНЫМИ РЕСУРСАМИ

*Колпашиков В.Ю., «ЭКОПРЕСС Групп», Россия, г. Н. Новгород*

*В последнее время все большую актуальность принимает проблема сбора, транспортировки и переработки отходов. Скопление бумаги, пленки, полимерной тары и другого упаковочного материала загромаждают склады и подсобные помещения торговых центров, предприятий, складов. Объемы образующихся отходов растут, а методы сбора и транспортировки ни как нельзя назвать современными.*

ЭКОПРЕСС Групп — официальный представитель шведского концерна ECOPESS на рынке России и поставщик различного оборудования для комплексного решения проблемы отходов.

Основная продукция концерна:

- мобильные и стационарные компакторы (пресс-контейнеры) для прессования различного вида отходов и вторсырья;
- гидравлические системы крюкового захвата сменных кузовов, зачастую носящие название «мультилифт», и системы лифтампер (портальной погрузки);
- прицепы для перевозки сменных кузовов;
- сменные кузова, бункера и контейнеры для отходов и вторичного сырья различного типа.

Использование техники, производимой концерном, позволяет сократить объем отходов, ожидающих утилизации, снизить затраты на их вы-

воз, получать доход от реализации вторсырья, сократить поток поступления отходов на полигоны и мусоросжигательные заводы.

• **Первым звеном** предлагаемой концерном эффективной системы управления отходами является прессование отходов при помощи компакторов (пресс-контейнеров). Вывоз непрессованных отходов в бункерах и контейнерах неоправданно дорог, поскольку предприятиям зачастую приходится платить за «вывоз воздуха». Пресс-контейнер, по сравнению с обычным контейнером, способен, в зависимости от типа отходов, вместить в 10 раз больше. Такой эффект обеспечивается наличием прессующего механизма, который уплотняет прессуемый материал в прикрепленный к прессу контейнер. Эта технология позволяет значительно снизить стоимость вывоза отходов за счет сокращения их объема. Таким